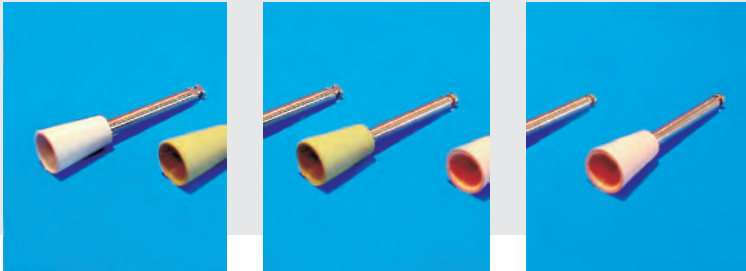


KATJA ANETSMANN

**OBERFLÄCHENQUALITÄT VON VIER NANOPARTIKEL-
KOMPOSITEN UND EINEM HYBRIDKOMPOSIT NACH
ANWENDUNG VERSCHIEDENER POLIERVERFAHREN**



INAUGURALDISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Zahnmedizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung des Autors oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2009

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Author or the Publishers.

1st Edition 2009

© 2009 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

**Oberflächenqualität von vier Nanopartikelkompositen und einem Hybridkomposit nach
Anwendung verschiedener Polierv Verfahren**

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von
Katja Anetsmann, geb. Eichelberger
aus Berlin

Gießen 2009

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Abteilung Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde
Direktor: Prof. Dr. J. Klimek
des Universitätsklinikums Gießen und Marburg, Standort Gießen

Gutachter: Prof. Dr. M. Jung

Gutachter: Prof. Dr. Dr. H.-P. Howaldt

Tag der Disputation: 14.07.2009

Meiner Familie

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Literaturübersicht | 5 |
| 2.1 | Komposite in der Zahnheilkunde | 5 |
| 2.1.1 | Entwicklung der Komposite | 5 |
| 2.1.2 | Zusammensetzung der Komposite | 5 |
| 2.1.3 | Klassifizierung der Komposite | 7 |
| 2.1.3.1 | Konventionelle Makrofüllerkomposite | 7 |
| 2.1.3.2 | Mikrofüllerkomposite | 8 |
| 2.1.3.3 | Hybridkomposite | 9 |
| 2.1.4 | Nanotechnologisch modifizierte Komposite und deren werkstoffkundliche Eigenschaften | 9 |
| 2.2 | Bedeutung der Oberflächenqualität von Kompositen | 12 |
| 2.2.1 | Plaueakkumulation | 13 |
| 2.2.2 | Verschleißfestigkeit und Abrasivität | 14 |
| 2.2.3 | Verfärbungsverhalten | 16 |
| 2.2.4 | Oberflächenglanz | 17 |
| 2.3 | Methoden zur Politur | 18 |
| 2.4 | Methoden zur Beurteilung von Kompositoberflächen | 23 |
| 3 | Material und Methode | 28 |
| 3.1 | Verwendete Komposite | 28 |
| 3.2 | Herstellung der Kompositprüfkörper | 30 |
| 3.3 | Instrumente für die rotierende Bearbeitung | 31 |
| 3.3.1 | Ausarbeitungsinstrumente | 31 |
| 3.3.2 | Polierinstrumente | 32 |
| 3.4 | Bearbeitung der Kompositprüfkörper | 37 |
| 3.5 | Evaluation der untersuchten Kompositoberflächen | 39 |
| 3.5.1 | Quantitative Beurteilung mittels Profilometer | 39 |
| 3.5.1.1 | Messbedingungen (gemäß DIN 4768) | 40 |
| 3.5.1.2 | Parallelaufzeichnung | 41 |
| 3.5.1.3 | Vorbereitung der Prüfkörper | 42 |
| 3.5.1.4 | Ermittelte Rauheitskenngrößen (gemäß DIN 4768) | 42 |
| 3.5.1.5 | Prüfstatistische Auswertung | 43 |
| 3.5.2 | Qualitative Beurteilung mittels Rasterelektronenmikroskop | 43 |
| 3.5.2.1 | Auswahl und Vorbereitung der Prüfkörper | 44 |
| 3.5.2.2 | Anfertigung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen | 44 |
| 3.5.2.3 | Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen | 45 |
| 4 | Ergebnisse | 46 |
| 4.1 | Quantitative Beurteilung | 46 |
| 4.1.1 | Vergleichende Betrachtung der Komposite anhand des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) | 46 |
| 4.1.2 | Vergleichende Betrachtung der Komposite anhand des Profillängenverhältnisses (LR) | 48 |
| 4.1.3 | Einfluss der Poliersysteme auf die Kompositoberflächen unter Betrachtung des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) | 49 |
| 4.1.4 | Einfluss der Poliersysteme auf die Kompositoberflächen unter Betrachtung des Profillängenverhältnisses (LR) | 50 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.1.5 | Vergleichende Betrachtung der Bearbeitungsmethoden anhand des arithmetischen Mittenrauwert (R_a) | 52 |
| 4.1.6 | Vergleichende Betrachtung der Bearbeitungsmethoden anhand des Profillängenverhältnis (LR) | 54 |
| 4.2 | Qualitative Beurteilung | 57 |
| 4.2.1 | Deskriptive Auswertung der rasterelektronen-mikroskopischen Aufnahmen | 57 |
| 4.2.1.1 | Kompositoberflächen im REM nach Politur mit Astropol | 57 |
| 4.2.1.2 | Kompositoberflächen im REM nach Politur mit Enhance/PoGo | 59 |
| 4.2.1.3 | Kompositoberflächen im REM nach Politur mit OptiShine | 60 |
| 4.2.1.4 | Kompositoberflächen im REM nach Politur mit Sof-Lex Disks | 62 |
| 4.2.2 | Semi-quantitative Auswertung der REM-Aufnahmen | 64 |
| 5 | Diskussion | 66 |
| 5.1 | Diskussion der Methodik | 66 |
| 5.1.1 | Studiendesign | 66 |
| 5.1.2 | Untersuchte Materialien | 66 |
| 5.1.3 | Angewandte Ausarbeitungsverfahren und Poliersysteme | 67 |
| 5.1.4 | Bearbeitung der Prüfkörper | 69 |
| 5.1.5 | Quantitative Beurteilung mittels Profilometer | 69 |
| 5.1.6 | Qualitative Beurteilung mittels REM | 71 |
| 5.2 | Diskussion der Untersuchungsergebnisse | 72 |
| 5.2.1 | Einfluss der Kompositmaterialien | 72 |
| 5.2.2 | Einfluss der Bearbeitungsmethoden | 74 |
| 5.3 | Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Autoren | 78 |
| 5.4 | Klinische Relevanz der Ergebnisse | 82 |
| 5.5 | Schlussfolgerungen | 85 |
| 6 | Zusammenfassung | 86 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 91 |
| 8 | Anhang | 106 |
| 8.1 | Tabellarische Darstellung der profilometrischen Messergebnisse | 107 |
| 9 | Danksagung | 109 |

1 Einleitung

Dentale Kompositwerkstoffe gehören heute als zahnfarbene plastische Füllungsmaterialien zum Standard der modernen Füllungstherapie und werden seit Jahren erfolgreich eingesetzt [Hickel, 1997]. Dem Wortsinn nach versteht man unter Kompositen zusammengesetzte Werkstoffe. Sie bestehen aus organischer Matrix, anorganischen Füllpartikeln und einer Verbundphase. Komposite können nach der Art und Größe der verwendeten Füllkörper klassifiziert werden. Es wird unterteilt in Makrofüller-, Mikrofüller- und Hybridkomposite. Ein gesteigertes ästhetisches Bewusstsein der Patienten und die zunehmende Ablehnung des Füllungswerkstoffes Amalgam veranlassten Wissenschaftler und Praktiker, neue Restaurationsmaterialien zu erforschen und vorhandene in ihrer Anwendung zu optimieren. Somit wurde in den letzten Jahren eine Fülle von Kompositmaterialien eingeführt, welche nicht nur die Kaufunktion wiederherstellen, sondern auch den Erwartungen der Patienten hinsichtlich der Ästhetik entsprechen sollen. Eine ständige Optimierung der mechanischen Eigenschaften, wie Härte, Verschleißfestigkeit sowie Verbesserung der Farbanpassung und der Polierbarkeit verlängert die klinische Haltbarkeit und erhöht die Akzeptanz, sowohl seitens der Behandler als auch der Patienten [Szep et al., 2002].

Mit dem Ziel, die Oberflächenqualität und gleichzeitig die physikalisch-technischen Eigenschaften zu verbessern, wurden nanotechnologisch modifizierte Komposite entwickelt. Die sogenannten Nanokomposite verfügen über ähnlich große Füllkörper wie Mikrofüllerkomposite, allerdings sind die einzelnen, nichtagglomerierten Nanomere gleichmäßiger in der organischen Matrix verteilt. Der Füllkörpergehalt entspricht dem der Hybridkomposite. Somit soll die sehr gute Polierbarkeit der Mikrofüllerkomposite mit den optimalen mechanischen Eigenschaften der Hybridkomposite kombiniert werden. Ziel war es, ein Universalkomposit zu schaffen, das den Anforderungen im Front- und Seitenzahnbereich gerecht wird [Mitra et al., 2003; Manhart, 2006].

Nach dem Einbringen und Aushärten des Komposites in der Kavität erfolgt die Ausarbeitung und Politur der Füllungs Oberfläche mit rotierenden Instrumenten. Die Ausarbeitung gliedert sich in drei Schritte. Zuerst werden durch eine Grobausarbeitung die Füllungsüberschüsse entfernt. Gleichzeitig wird auch die beim Aushärten entstandene Sauerstoffinhibitionsschicht abgetragen. Es handelt sich dabei um eine füllstoffarme Oberflächenschicht mit geringer Abrasionsresistenz. Bei dem anschließenden Konturieren erfolgen die morphologische

Gestaltung und das okklusale Adjustieren der Füllung. Danach wird die aufgeraute Füllungsoberfläche durch Finieren geglättet. Nach der Ausarbeitung ist jedoch noch eine gewisse Oberflächenrauigkeit vorhanden. Die Politur ebnet die verbliebenen Rauigkeiten ein und sorgt für eine glatte und glänzende Oberfläche. Eine adäquate Politur ist von großer Bedeutung für die Lebensdauer der Kompositfüllung, denn raue Füllungsoberflächen fördern die Plaqueanlagerung und somit die Entstehung von Sekundärkaries und Gingivitiden [Carlen et al., 2001; Kawai et al., 2001]. Des Weiteren führen raue Kompositoberflächen zu erhöhten Verschleißerscheinungen [Mandikos et al., 2001; Yap et al., 2004]. Eine gut polierte und somit glatte und glänzende Füllungsoberfläche weist eine geringere Verfärbungstendenz auf und ist ästhetisch ansprechend [Choi et al., 2005; Lu et al., 2005].

Zur Ausarbeitung werden Diamantfinierer unterschiedlicher Korngröße oder Hartmetallfinierer, die in der Form und Anzahl der Schneiden variieren können, eingesetzt [Pratten et al., 1988]. Für die Politur gibt es eine große Auswahl an unterschiedlichsten Polierinstrumenten, die auf verschiedenen Funktionsprinzipien basieren. Am häufigsten werden Gummi- und Silikonpolierer, flexible Scheiben, Filzräder, Polierpasten und abrasive Bürstchen verwendet [Barghi, 2000; Baseren, 2004; Jung et al., 2005; Rzanny et al., 2003]. Die Art der Anwendung unterscheidet sich zum Beispiel in der Anzahl der Polierschritte. Die meisten Poliersysteme sind mehrstufig mit einer Abstufung von rau zu fein. In den letzten Jahren werden auch vermehrt einstufige Polierverfahren auf dem Dentalmarkt angeboten. Sie versprechen eine Politur in kürzerer Zeit.

Ziel der vorliegenden in vitro Studie war es, mit Hilfe profilometrischer und rasterelektronenmikroskopischer Untersuchungen die Oberflächenqualität von vier Nanokompositen und einem traditionellen Hybridkomposit nach unterschiedlicher Ausarbeitung und Politur zu bewerten. Dabei sollte die Eignung von vier unterschiedlichen Poliersystemen in Kombination mit verschiedenen Ausarbeitungsverfahren untersucht werden.

2 Literaturübersicht

2.1 Komposite in der Zahnheilkunde

2.1.1 Entwicklung der Komposite

Im Jahre 1962 entwickelte Bowen das Bisphenol-A-Glycidyl-Dimethacrylat (Bis-GMA) mit Zusatz von anorganischen Füllstoffen in Form von gemahlenem Quarz. Die Füllstoffe wurden mit einer Silanverbindung überzogen, welche eine chemische Bindung sowohl mit der organischen Matrix als auch mit den anorganischen Füllern einging. Dadurch wurden beide Phasen miteinander verbunden. Bis zu jenem Zeitpunkt kamen nur chemisch härtende Polymethylmethacrylate zur Anwendung. Sie zeigten eine ungenügende Abrasionsstabilität, besaßen eine hohe Polymerisationsschrumpfung und waren aufgrund des hohen Restmonomersgehaltes pulpaschädigend. Aufgrund ihrer Struktur war eine ausreichende Politur nicht möglich und es kam schon nach kurzer Liegezeit zu Verfärbungen. Der von Bowen entwickelte Kunststoff, heute als konventionelles oder makrogefülltes Komposit bekannt, wies deutlich bessere physikalische Eigenschaften auf und stellte einen großen Fortschritt in der Füllungstechnologie dar. Seitdem wurde eine Vielzahl von Kompositfüllungsmaterialien, basierend auf Bis-GMA oder anderen bifunktionellen Methacrylat-Monomeren, entwickelt. Ab Mitte der siebziger Jahre kamen mikrogefüllte Komposite auf den Markt. Sie zeigten eine höhere Verschleissresistenz und bessere Oberflächeneigenschaften als Makrofüllerkomposite. Mit der Entwicklung der Hybridkomposite, Ende der 80er Jahre, wurde eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erzielt [Baseren, 2004; Hellwig et al., 2003].

2.1.2 Zusammensetzung der Komposite

Dem Wortsinn nach versteht man unter Kompositen zusammengesetzte Werkstoffe. Sie bestehen aus organischer Matrix, anorganischen Füllpartikeln und einer Verbundphase.

Die **organische Matrix** hat neben den Füllkörpern einen wichtigen Einfluss auf die Eigenschaften der Komposite. Sie setzt sich aus Monomeren, Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffen, Pigmenten und anderen Additiva zusammen. Zu den gebräuchlichsten

Monomeren zählen Bisphenol-A-Glycidyl-Dimethacrylat (Bis-GMA), Triethylen-Glycol-Dimethacrylat (TEGDMA) und Urethandimethacrylat (UDMA) [Hellwig et al., 2003]. Das Monomer ist hauptsächlich für die Wasseraufnahme, die Polymerisationsschrumpfung und die Viskosität verantwortlich. Diese Eigenschaften werden von der molekularen Struktur und der Konversionsrate der Kohlenstoffdoppelbindungen der Acrylgruppen bestimmt. Je länger die Molekülketten des Monomers sind, desto geringer ist die Polymerisationsschrumpfung. Langkettige Monomere weisen jedoch eine höhere Viskosität auf.

Die Konversionsrate von Bis-GMA kann durch Hinzugabe von Verdünnungsmonomeren (z.B. TEGDMA), die zu einer Steigerung der Molekülbeweglichkeit führen, erhöht werden. Dadurch wird eine höhere chemische Resistenz und Festigkeit erzielt. Da die kurzkettigen Verdünnungsmonomere eine erhöhte Polymerisationsschrumpfung aufweisen, muss ein optimales Verhältnis von Monomer zu Verdünnungsmittel gefunden werden. Eine typische Zusammensetzung besteht aus 75 Gew.-% Bis-GMA und 25 Gew.-% TEGDMA. Um die Nachteile der Verdünnungsmonomere zu reduzieren, wurden modifizierte Bowen-Kunststoffe, wie das Ethoxyliertes Bisphenol A-dimethacrylat (EBADMA), mit niedriger Viskosität entwickelt. Ihr Einsatz trägt zur Reduktion der Polymerisationsschrumpfung bei. Foster und Walker (1974) entwickelten das UDMA, welches aufgrund der Abwesenheit des Phenolringes in der Monomerkette, eine höhere Flexibilität und Zähigkeit im Vergleich zu Bis-GMA zeigt. In Comonomermischungen von Bis-GMA und UDMA bewirkt Bis-GMA eine erhöhte Reaktivität und UDMA eine höhere Konversionsrate. Durch eine äquimolekulare Mischung der beiden wird eine besonders schnelle Polymerisationsrate erreicht [Ilie et al., 2005].

Für den **Verbund** von Füllkörpern mit organischer Matrix werden die Füllstoffe silanisiert. Dabei kommt es zu einer Hydrophobierung des Füllstoffes und anschließend zu einer Polymerisation der Monomere mit dem Methacrylatsäurerest des Silans. Mit dem Verbund steigt die mechanische Festigkeit des Komposits [Hellwig et al., 2003].

Als **anorganische Füllkörper** werden Quarz, Keramik und Siliziumdioxid verwendet. Sie dienen der Verbesserung physikalischer und mechanischer Eigenschaften der Kunststoffmatrix. Die Druck- und Zugfestigkeit, das Elastizitätsmodul und die Verschleißfestigkeit des Materials werden erhöht [Hellwig et al., 2003]. Füllkörper verringern die Polymerisationsschrumpfung und den linearen thermischen Expansionskoeffizienten. Während die Kunststoffmatrix schrumpft, bleibt der Füllkörper

volumenstabil. So kann die Gesamtschrumpfung von ungefähr zehn bis 20 Prozent der ungefüllten Matrix auf zwei bis drei Prozent reduziert werden [Ernst et al., 2003]. Füllkörpergehalt und -größe sind beeinflussende Faktoren für die Polierbarkeit von Kompositrestaurationen. Der Durchmesser der Füllstoffpartikel im Komposit muss unter der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegen. Dies sichert, dass Veränderungen an der Oberfläche durch herausgelöste Partikel während der Politur oder während des Verschleißes für das Auge unsichtbar bleiben [Rzanny et al., 2003].

2.1.3 Klassifizierung der Komposite

Komposite werden heute nach der Art und Größe der verwendeten Füllkörper klassifiziert. Es wird unterteilt in Makrofüller-, Mikrofüller- und Hybridkomposite.

2.1.3.1 Konventionelle Makrofüllerkomposite

Konventionelle Komposite, auch als Makrofüllerkomposite bekannt, enthalten rein anorganische Partikel aus Quarz, Glas oder Keramik. Um eine Röntgenopazität zu erzielen, sind die Gläser schwermetalhaltig (Barium-, Strontiumglas). Die durchschnittliche Füllkörpergröße liegt zwischen 1,5 und 15 μm und damit über der Wellenlänge des Lichts. Der Füllstoffgehalt beträgt etwa 75 Gew.-%. Zwar haben die verwendeten Gläser sehr gute physikalische Werte, jedoch der Härteunterschied zwischen Füller und Matrix führt bei gleichzeitiger Hydrolyse der Verbundphase zum Herausbrechen der Füllkörper aus der Matrix. Die Oberfläche bleibt rau und lässt sich nicht polieren. Dies begünstigt die Plaqueentstehung. Der Verlust der oberflächlichen Füllkörper führt zu einem äußeren Stabilitätsverlust und manifestiert sich klinisch als Abrasion. Makrofüller weisen daher ein schlechtes Verschleißverhalten auf und kommen als Füllungsmaterial nicht mehr zum Einsatz [Ernst et al., 2003; Hellwig et al., 2003; Ward, 2005].

2.1.3.2 Mikrofüllerkomposite

Mikrofüllerkomposite enthalten Füllstoffe aus hochdisperser Kieselsäure (Siliziumdioxid) mit einer Größenverteilung zwischen 0,007 und 0,04 μm und einer mittleren Teilchengröße von 0,05 μm . Bedingt durch die kleine Füllkörpergröße lassen sich mikrogefüllte Kompositmaterialien optimal polieren und behalten ihren Oberflächenglanz. Bei Füllerverlusten werden auf der Oberfläche keine Rauigkeiten sichtbar, da der Durchmesser der Füllpartikel kleiner als die Wellenlänge des Lichtes ist. Sie sind verschleißfester als die makrogefüllten Komposite, da die Partikel deutlich kleiner und gleichmäßiger an der Oberfläche verteilt sind. Daher bieten sie wenig Retentionsfläche für füllerherauslösende Verschleißprozesse. Bei den sogenannten homogenen Mikrofüllerkompositen ist der Füllstoffgehalt mit 50 Gew.-% sehr gering, was zu einer starken Polymerisationsschrumpfung führt. Um dem entgegenzuwirken, wurden inhomogene Mikrofüllerkomposite entwickelt. Dies kann durch unterschiedliche Verfahren geschehen. Zum einen können mikrogefüllte Kompositmaterialien zu splitterförmigen Vorpolymerisaten zermahlen werden oder die Herstellung von Vorpolymerisaten erfolgt in Kugelform, die man dann der Kompositmatrix zusammen mit weiteren Mikrofüllern zusetzt. Damit erhöht man den Füllstoffanteil, ohne dass die Konsistenz so zähflüssig wird, dass ein solches Material nicht mehr zu verarbeiten wäre. Ein weiterer Weg ist die Sinterung der Siliziumdioxidteilchen und die anschließende Zerkleinerung in gröbere Partikel. Durch die Zugabe derartiger Mikrofülleragglomerate in die Matrix erhöht sich der Füllstoffgehalt auf 70 bis 80 Gew.-%. Jedoch kann es an den Grenzflächen der splitterförmigen Vorpolymerisate zur Matrix während der Polymerisation oder während der Kaubelastung zu Rissen kommen [Hellwig et al., 2003].

In den physikalischen Eigenschaften sind die Mikrofüllerkomposite den Hybridkompositen unterlegen. Sie werden primär bei Kavitäten der Klasse I, III und V nach Black angewendet. Dabei handelt es sich um Kavitäten im Bereich der Fissuren (Klasse I), im Bereich der Approximalflächen von Schneide- und Eckzähnen (Klasse III) sowie Kavitäten der bukkalen und lingualen Glättflächen (Klasse V). Klinische Studien beweisen, dass Mikrofüllerkomposite in stark belasteten Regionen einen hohen Prozentsatz an Materialbrüchen aufweisen, z.B. beim Eckenaufbau von Schneidezähnen [Duke, 2003].

2.1.3.3 Hybridkomposite

Bei den Hybridkompositen wurden die optimalen physikalischen Eigenschaften der als Makrofüllkörper verwendeten Gläser mit der hervorragenden Politurfähigkeit der als Mikrofüllkörper eingesetzten pyrogenen Kieselsäuren vereinigt. 85-90 Gew.-% der Füllkörper sind Makrofüller und 10-15 Gew.-% sind Mikrofüller. Der Füllkörpergehalt des gesamten Materials lässt sich so auf bis zu 85% steigern [Hellwig et al., 2003]. Dadurch besitzen Hybridkomposite signifikant günstigere physikalische und mechanische Eigenschaften gegenüber Mikrofüllerkompositen [Duke, 2003]. Während bei dem Oberbegriff Hybridkomposit mittlere Füllkörpergrößen bis zu 10 µm enthalten sind, enthält ein Feinpartikelhybridkomposit Füllkörper bis zu 5 µm Korngröße, ein Feinstpartikelhybridkomposit bis zu 3 µm und Submikrometerhybridkomposit eine mittlere Füllkörpergröße von unter 1 µm aber nicht unter 0,4 µm. Submikrohybridkomposite, die auch als Mikrohybridkomposite bekannt sind werden als universelles Füllungsmaterial angewendet [Ernst et al., 2003; Manhart, 2006]. Die Politurergebnisse von Hybridkompositen sind klinisch akzeptabel, jedoch reichen sie nicht an die hervorragenden Politureigenschaften der Mikrofüllerkomposite heran [Ernst et al., 2003]. Bei Abnutzung der Füllungsoberfläche durch Abrasionsvorgänge wird die Kunststoffmatrix zwischen den Partikeln abgetragen und die anorganischen Füllkörper ragen heraus. Schließlich werden die Füllpartikel aus der Oberfläche gerissen und es entstehen Krater, die zu einer rauen Oberfläche führen. Somit wird die Reflektionsfähigkeit der polierten Kompositoberfläche beeinträchtigt [Ernst et al., 2003; Williams et al., 1993].

2.1.4 Nanotechnologisch modifizierte Komposite und deren werkstoffkundliche Eigenschaften

Mit der Suche nach einem Universalkomposit, das den Anforderungen im Front- und Seitenzahnbereich gerecht wird, entstand eine neue Gruppe von Restaurationsmaterialien, die nanotechnologisch modifizierten Komposite, auch Nanokomposite genannt. Sie vereinigen die Eigenschaften von Hybrid- und Mikrofüllerkompositen. Die sehr gute Polierbarkeit der Mikrofüllerkomposite soll mit den optimalen mechanischen Eigenschaften der Mikrohybridkomposite kombiniert werden.

Heute gilt die Nanotechnologie, auch Molekulartechnik genannt, als der Zweig der Wissenschaft, von dem große Impulse ausgehen. Durch die Anwendung verschiedener chemischer und physikalischer Systeme wird die Herstellung von Werkstoffen und Strukturen im Bereich von 0,1-100 nm ermöglicht. Mit Hilfe von Nanowerkstoffen ist es möglich, die Struktur von Materialien zu verändern und damit erhebliche Verbesserungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften zu erzielen. Es werden Nanokomposite verschiedenster Art für unterschiedliche Anwendungen entwickelt, zum Beispiel für Strukturmaterialien, Katalysatoren sowie elektronische und biomedizinische Systeme. In der Zahnheilkunde wird die Nanotechnologie bei der Füllkörperherstellung eingesetzt [Mitra et al., 2003]. Zahnmedizinische Nanokompositmaterialien enthalten Nanopartikel mit einem Durchmesser von 5-100 nm.

Bei der herkömmlichen Füllkörperherstellung wird die Korngröße der Füllwerkstoffe durch einen Mahlprozess eingestellt. Es handelt sich um das „top-down“ Prinzip, d.h. von großen Teilchen ausgehend, werden die Teilchen bis zu einer Größe von 100 nm gemahlen. In der Nanotechnologie hingegen werden die Nanofüllkörper mit einem neuen Verfahren hergestellt. Die Partikel werden durch chemische Syntheseprozesse aus verschiedenen Bausteinen gezielt aufgebaut. Dieser Vorgang wird dann am gewünschten Zielpunkt abgebrochen, so dass sphärische Teilchen mit genau definierter Korngröße und Zusammensetzung resultieren. Durch die chemischen Syntheseprozesse werden die Eigenschaften der Füllkörper in der Produktionsphase festgelegt und nicht durch die Eigenschaften der Rohstoffe bestimmt. Man spricht hier von dem „bottom-up“ Prinzip [Manhart, 2006; Mitra et al, 2003].

Nanokomposite verfügen somit über ähnlich große Füllkörper wie Mikrofüllerkomposite, allerdings sind die einzelnen, nicht agglomerierten Nanomere gleichmäßiger in der organischen Matrix verteilt und der Füllkörpergehalt entspricht dem der Hybridkomposite, deren gute mechanischen Eigenschaften sie auch aufweisen sollen [Manhart, 2006]. Die Partikelgröße der Nanofüllkörper liegt unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes (0,4-0,77µm). Dies wirkt sich auf die optischen Eigenschaften des Nanokomposites besonders positiv aus. Die während des Verschleißes heraus gelösten einzelnen Nanomere hinterlassen Rauigkeiten, die für das menschliche Auge nicht sichtbar sind. So soll eine hohe Glanzbeständigkeit erzielt werden [Mitra et al., 2003].

Der Überbegriff Nanokomposite umfasst zum einen die Nanofüllerkomposite (Nanomikrofüllerkomposit), die den Mikrofüllerkompositen angehören; und zum anderen Nanohybridkomposite, die zu den Hybridkompositen zählen. Nanofüllerkomposite enthalten ausschließlich Füllkörper im Nanometerbereich. Nanohybridkomposite enthalten Füllkörper unterschiedlicher Korngrösse, darunter auch Nanofüller.

Ein Beispiel für Nanofüllerkomposite ist Filtek Supreme. Es besteht aus einer Kombination von Nanomeren und Nanoclustern. Unter Nanomeren versteht man einzelne nicht-agglomerierte Partikel mit einer Größe von 20-75 nm. Nanocluster sind locker vernetzte Agglomerate aus einzelnen Nanomeren. Sie haben eine Größe von 0,6-1,4 μm . Zudem sind feinstkörnige röntgenopake Zirkonoxid-Füllkörper in einer mittleren Größe von 2-5 nm integriert, die für die Röntgenopazität verantwortlich sind. Die Kombination von Nanomeren und Nanoclustern reduziert die Entstehung von Lücken zwischen den Füllpartikeln. Das soll einen höheren Füllergehalt und bessere physikalische Eigenschaften garantieren. Die Agglomerate agieren als eine Einheit und bestimmen somit die Härte des Komposites. Sie entsprechen der Funktion der Füller in Hybridkompositen. Im Laufe der Abnutzung werden nicht die Cluster selbst, sondern nur einzelne Nanomere aus der Materialmasse gelöst. Somit bleibt die Oberfläche glatt und im Vergleich zu traditionellen Hybridkompositen soll eine höhere Glanzbeständigkeit gewährleistet sein [Mitra et al., 2003; Davis, 2003].

Nanohybridkomposite enthalten zusätzlich zu den Nanofüllern weitere größere Füllkörper im Mikrometerbereich. Dabei handelt es sich meist um konventionelle Glasfüller, wie sie in herkömmlichen Hybridkompositen vorkommen. Allerdings sind sie homogener in der Matrix verteilt und von feinen Nanopartikeln umgeben, die den Matrixanteil reduzieren. Daraus resultiert zum einen eine niedrigere Schrumpfungsrates, da nur der Anteil der organischen Matrix die störende Volumenveränderung des Komposites verursacht. Zum anderen bleibt die gute Polierfähigkeit, wie bei bekannten Mikrofüllern, erhalten. Durch die Kombination großer und kleiner Füllstoffe wollte man außerdem die Festigkeit des Materials erhöhen und eine geringere Abrasion erzielen.

Beispiele für Nanohybridkomposite sind Ceram X Duo oder Grandio. Sie enthalten neben konventionellen Füllern, wie feingemahlene Glaskeramiken, freie, nicht zusammenhängende Nanofüllkörper. Dadurch wird eine optimale Raumausfüllung der Füllstoffe realisiert, was wiederum zu einem hohen Füllkörpergehalt führt und somit eine geringere

Polymerisationsschrumpfung bewirken soll. Bei einigen Nanohybridkompositen, wie Tetric Evo Ceram oder Premise, werden zusätzlich noch sogenannte Vorpolymerisate eingesetzt. In Kapitel 2.1.3 wurde auf die Verwendung von Vorpolymerisaten bei inhomogenen Mikrofüllerkompositen eingegangen. Sie sollen eine zusätzliche Erhöhung des Füllkörpergehaltes und eine weitere Reduzierung der Polymerisationsschrumpfung bewirken. Bei Nanohybridkompositen werden zur Herstellung des Vorpolymerisates Nanofüller beigemischt. Die Vorpolymerisate werden bis ungefähr auf Korngrösse eines Makrofüllers fein gemahlen. Bei der Polymerisation integrieren sie sich gleichmäßig in das Material. Durch den Einsatz von Nanofüllern in das Vorpolymerisat soll die Bildung von Rissen zwischen Präpolymeren und organischer Matrix verhindert werden [Terry, 2004; Ward, 2005].

Inwieweit die Nanokomposite ihren Versprechungen gerecht werden, müssen zunächst unabhängige in vitro und in vivo Studien zeigen. Umfangreiche materialkundliche Tests müssen beweisen, dass mit den Nanokompositen vergleichbare mechanische Eigenschaften zu erzielen sind, wie sie von den modernen Hybridkompositen her bekannt sind. Viele Hybridkomposite befinden sich seit über einem Jahrzehnt auf dem Markt und werden im Front- und Seitenzahnbereich universell eingesetzt. Somit existiert eine große Anwendersicherheit aufgrund der jahrelangen guten klinischen Erfahrungen. Die physikalischen Daten dieser Hybridkomposite werden demnach auch immer als der Goldstandart herangezogen, an dem sich Neuentwicklungen messen müssen [Ernst et al., 2003].

2.2 Bedeutung der Oberflächenqualität von Kompositen

Eine qualitativ hochwertige Oberflächentextur ist von ausschlaggebender Bedeutung für den klinischen Erfolg und das ästhetische Erscheinungsbild einer Kompositrestauration. Glatte Füllungsoberflächen reduzieren bakterielle Plaqueretentionen und beugen gingivalen Irritationen und Sekundärkaries vor [Bollen et al., 1997; Shintani et al, 1985; Weitman et al., 1975]. Außerdem hat die Oberflächenqualität direkte Auswirkungen auf den Verschleiß, die Abrasivität sowie die Farbresistenz und den Glanz [Chan et al., 1980; Herrgott et al., 1989; Morgan, 2004].

2.2.1 Plaqueakkumulation

Eine Zunahme von Bakterien- oder Plaqueansammlungen induziert die Entstehung von Karies und Gingivitis. Die Plaqueakkumulation wird durch Oberflächenrauigkeit, elektrische Eigenschaften, Hydrophilie und oberflächenfreie Energie beeinflusst. Die Oberflächenrauigkeit spielt die wichtigste Rolle für die initiale Plaqueadhäsion auf Restaurationsmaterialien [Kawai et al., 2001]. Viele Studien bestätigen, dass mit zunehmender Oberflächenrauigkeit die Plaqueansammlung ansteigt [Bollen et al., 1997; Carlen et al., 2001; Kawai et al., 2001; Quirynen et al., 1997]. Im frühen Stadium erfolgt die Bakterienadhäsion durch elektrostatische und van-der-Waals Kräfte. Die Bakterien fixieren sich an Mikroretentionsstellen auf der Oberfläche. Eine feste Verbindung zwischen Bakterium und Oberfläche wird durch spezifische extrazelluläre proteinartige Komponenten des Bakteriums und komplementäre Pellikelrezeptoren auf der Oberfläche erreicht. In der anschließenden mikrobiologischen Kolonisation vermehren sich die Bakterien. Durch spezifische interbakterielle Adhäsion entsteht ein Biofilm [Bollen et al., 1997]. Die oberflächenfreie Energie beeinflusst ebenfalls die Plaqueakkumulation. Mit zunehmender Oberflächenenergie wird die bakterielle Adhäsion erleichtert und es kommt zu einer vermehrten Plaquebildung [Carlen et al., 2001; Sen et al., 2002].

Kawai et al. untersuchten in einer in vitro Studie die Adhäsion von artifizieller Plaque auf verschiedenen Restaurationsmaterialien in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit. Die eine Hälfte der untersuchten Prüfkörperoberflächen wurde nur finiert (600 grit), während die andere Hälfte zusätzlich poliert wurde. Die Untersuchung machte deutlich, dass mit der Politur die Plaqueansammlung drastisch abnahm. An den unpolierten Probenoberflächen erfolgte die größte Bakterienadhäsion an Amalgam, gefolgt von Komposit und Gold. Die geringste Bakterienadhäsion wurde an den unpolierten Keramikoberflächen beobachtet. Bei den polierten Prüfkörpern änderte sich diese Rangfolge. Hier wurde die höchste Bakterienadhäsion an Gold, gefolgt von Amalgam und Keramik festgestellt. Auf den polierten Kompositoberflächen adhärierte die geringste Menge an Bakterien, wobei die Unterschiede zu den Keramiken nur geringfügig und nicht signifikant waren [Kawai et al., 2001].

Die Frage, ab wann eine Oberfläche glatt genug ist, um Einflüsse der Rauigkeit auf die Plaqueakkumulation nicht mehr nachweisen zu können, kann nicht eindeutig beantwortet

werden. Die Untersuchungsergebnisse verschiedener Studien differieren bezüglich dieser Frage stark. Profilunregelmäßigkeiten kleiner als die durchschnittliche Bakteriengröße von 1 μm werden als mögliche Schwelle diskutiert [Shintani et al., 1985]. In verschiedenen Studien wurden keine Unterschiede in der Plaqueakkumulation gefunden, wenn die R_a -Werte zwischen 0,7 und 1,44 μm lagen [Chung, 1994; Shintani, 1985; Weidmann et al., 1975]. Quirynen et al. stellten fest, dass die Oberflächenrauigkeit von Titanimplantaten bei einem R_a -Wert von unter 0,2 μm weder supra- noch subgingival Einfluss auf die Plaqueansammlung hatte. Da z.B. der Durchmesser einer Kokke ca. 1 μm beträgt, sind die Bedingungen einer Ablösung bei einem Mittenrauwert $< 0,2 \mu\text{m}$ günstiger als bei höheren Mittenrauwerten [Quirynen et al., 1996].

2.2.2 Verschleißfestigkeit und Abrasivität

Ein wesentlicher Parameter für die Langzeithaltbarkeit von Füllungen ist die adäquate Verschleißresistenz, die sich in der klinischen Abrasionsrate widerspiegelt [Krejci et al., 1990; Pelka et al., 1998]. Glatte Restaurationsoberflächen erhöhen die Verschleißresistenz und reduzieren die Abrasivität gegenüber antagonistischen Oberflächen [Willems et al., 1991].

Materialbedingte Faktoren, die den Verschleiß vor allem beeinflussen, sind Verschleißfestigkeit der Polymermatrix, Füllkörpergrad, -härte, -größe und -packungsdichte, chemische Beständigkeit des Verbundwerkstoffes sowie Art und Qualität des Füllstoff-Polymerverbundes, wobei sich diese gegenseitig beeinflussen. Mit der Abnahme der durchschnittlichen Füllkörpergröße und mit der Zunahme des Füllergehaltes kann die Verschleißresistenz signifikant verbessert werden [Manhart et al., 2000].

Für Restaurationen im okklusionstragenden Bereich müssen die Komposite in Abriebeigenschaft und Verschleißresistenz den natürlichen Zähnen entsprechen [Willems et al., 1991]. Unterschiede im Verschleißverhalten von Zahnhartsubstanz und Restaurationmaterial können zu einer Stufenbildung zwischen Zahn und Zahnersatzmaterial führen. Bei zu verschleißfesten Materialien kann eine Antagonistenschädigung in okklusalen Kontaktbereichen die Folge sein. Bei weniger verschleißfesten Werkstoffen kann der antagonistische okklusale Kontakt verloren gehen, was zu Antagonistenelongation und somit zur Entstehung funktioneller Störungen beitragen kann [Graf, 2002].

Tjan et al. wiesen eine positive Korrelation zwischen Oberflächenrauigkeit und Verschleißfestigkeit von Kompositoberflächen nach. In ihrer Untersuchung wurde deutlich, dass unpolierte Kompositoberflächen zu einer deutlich erhöhten Abrasion am Antagonisten und zu einem erhöhten Verschleißverhalten der Kompositoberfläche führen. Gut polierte Kompositoberflächen hingegen zeigten geringere Verschleißerscheinungen [Tjan et al., 1989].

In einigen Studien wird der Verschleiß unter anderem auf die Finier- und Poliermethoden zurückgeführt. Die rotierenden Instrumente sollen unter der Oberfläche Mikrorisse verursachen und somit zu einer Schwächung des Kompositgefüges führen, was den Verschleiß erhöht [Ratanapridakul et al., 1989; Söderholm et al., 1998]. Turssi et al. widerlegte diesen Zusammenhang und fand keine signifikante Korrelation zwischen der durch Finieren und Polieren verursachten Oberflächenrauigkeit und der Verschleissresistenz von Nanofüller- und Mikrohybridkompositen [Turssi et al., 2005].

Laut Willems et al. hat die Abrasion eines natürlichen Zahnes durch eine antagonistische Kompositfüllungsoberfläche nur dann klinische Bedeutung, wenn die Abnutzung des Schmelzes das Maß der physiologischen Abrasion übersteigt. Somit sollte die Politur der Füllungsoberfläche eine mindestens vergleichbare oder geringere Oberflächenrauigkeit als die antagonistische Schmelzoberfläche aufweisen [Willems et al., 1991]. Willems et al. ermittelten dabei profilometrisch einen arithmetischen Mittenrauwert von 0,64 µm bei antagonisierenden Schmelzoberflächen.

Ziel jeder Politur ist es, eine möglichst geringe initiale Oberflächenrauigkeit zu erlangen, da es während der Gebrauchsperiode zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität kommt [Rzanny et al., 2000]. Rzanny et al. untersuchte die abrasive Wirkung von Zahncreme und Zahnbürste auf polierten Kompositoberflächen. Dabei wurden verschiedene Kompositproben mit drei unterschiedlichen Poliersystemen bearbeitet und anschließend einer Bürstenabrasion ausgesetzt. Auf allen Prüfkörperoberflächen wurde eine Erhöhung des arithmetischen Mittenrauwertes nach der Bürstenanwendung festgestellt. Die Prüfkörper die nach dem Polieren die größte Oberflächenrauigkeit aufwiesen, zeigten auch nach der Bürstenabrasion die höchsten Rauigkeitswerte. Ein geringer initialer Mittenrauwert ist daher notwendig, damit dieser sich während der Gebrauchsperiode möglichst wenig erhöht [Rzanny et al., 2000].

2.2.3 Verfärbungsverhalten

Die Farbstabilität ist ein wichtiges Kriterium für den Langzeiterfolg einer Kompositfüllung. Substanzen wie Kaffee, Tee, Cola, Tabak, Rotwein führen zu unerwünschten äußeren Verfärbungen der Kompositoberfläche. Der Verfärbungsgrad einer Kompositrestauration ist abhängig von der Zusammensetzung des Komposites und der Oberflächenqualität [Gross et al., 1977, Yap et al., 1997].

Die Struktur der organischen Matrix und der Füllpartikel haben einen direkten Einfluss auf die Oberflächenglätte und die äußere Verfärbung von Kompositrestaurationen. Die Neigung der Komposite zu Verfärbungen ist in der Konversions- und Wasserresorptionsrate der Monomere begründet. Eine geringe Konversionsrate begünstigt die Resorption von Farbstoffen. Materialien mit hoher Wasserresorptionsrate verfärben sich sehr schnell. Hydrophobe Farbstoffe befinden sich stets in wässriger Lösung und nutzen das Wasser als Eindringmedium [Choi et al., 2005].

Oberflächenrauhigkeiten sind die Hauptursache für exogene Verfärbungen. Viele Studien belegten, dass die Farbresistenz der Kompositoberflächen signifikant von der Oberflächenrauhigkeit beeinflusst wird [Choi et al., 2005, Gross et al., 1977; Lu et al., 2005; Reis et al., 2003; Shintani et al., 1985; Patel et al., 2004; Yap et al., 1997]. Während des Verschleißes gehen anorganische Füllkörper verloren und die Oberfläche wird rau. In den Mikrorissen und -poren, in Lücken zwischen Füllkörper und Matrix können dann Farbsubstanzen leicht penetrieren und zu Verfärbungen führen [Patel, et al., 2004].

Lu et al. (2005) gaben polierte Kompositproben in eine Kaffeelösung und untersuchten das Ausmaß der Oberflächenverfärbung. Die Oberflächenrauhigkeit der Kompositprüfkörper hatte einen signifikanten Einfluss auf die Verfärbung. Mit der Rauigkeit und der Zeitdauer nahm die Verfärbung zu. Je kleiner die mittlere Rautiefe (R_a) war, desto größer war die Verfärbungsresistenz. Mikrofüller- und Nanofüllerkomposite zeigten deutlich kleinere R_a -Werte und somit geringe Verfärbungswerte als Mikrohybridkomposite. Bei dem Nanofüllerkomposit und dem Mikrohybridkomposit konnte kein Rauigkeitsgrenzwert festgestellt werden, unterhalb dessen die Verfärbungstendenz unverändert blieb. Die Verfärbung des Mikrofüllerkomposites dagegen wurde unterhalb eines R_a Wertes von 0,07 μm nicht mehr von der Rauigkeit beeinflusst. Dies könnte an der kleineren Füllkörpergröße

und der unterschiedlichen Zusammensetzung der Füllkörper und der organischen Matrix liegen [Lu et al., 2005].

In einer anderen Studie (Choi et al., 2005) wurden Nanofüllerkomposite, Mikrofüller- und Mikrohybridkomposite mit verschiedenen Poliersystemen bearbeitet und anschließend in 2%iges Methylenblau getaucht. Dabei zeigte sich, dass das Nanofüllerkomposit Filtek Supreme die stärkste Verfärbung aller Komposite aufwies. Eine mögliche Begründung dafür liegt in den Füllkörperaggregaten (Nanocluster). Zwischen den einzelnen Nanomeren im Aggregat befinden sich kleine Poren, in denen sich Farbstoffe festsetzen können [Choi et al., 2005].

2.2.4 Oberflächenglanz

Glanz spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung der ästhetischen Erscheinung einer Restauration [Hondrum et al., 1997]. Ein Komposit gilt dann als polierbar, wenn es schmelzähnlich auf Hochglanz poliert werden kann [Rzanny et al., 2003]. Die Zahnfarbe wird stark beeinflusst durch die Farbe des Dentins und die Dicke des hochreflektierenden Schmelzes. Optische Unterschiede zwischen natürlichem Zahn und Kompositrestauration entstehen trotz passender Zahnfarbe durch Abweichungen in Glanz oder Transluzenz. Andererseits kann ein Hochglanz Farbunterschiede maskieren [O'Brien, 1985]. Glanz ist ein optisches Phänomen. Eine Materialoberfläche zeigt großen Glanz, wenn alle Lichtstrahlen annähernd in dem gleichen Winkel reflektiert werden wie sie einfallen [Heintze et al., 2005].

Der Glanz wird direkt durch die Oberflächenrauigkeit beeinflusst [Lu et al., 2005]. Dieser positive Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern konnte in einigen Studien nachgewiesen werden [Hondrum et al., 1997; O'Brien, 1985; Lu et al., 2005, Paravina et al., 2004]. Lu et al. (2005) untersuchten verschiedene Oberflächeneigenschaften von einem Mikrofüller- und einem Nanofüllerkomposit sowie zwei Mikrohybridkompositen. Sie ermittelten dabei für alle untersuchten Komposite eine signifikante lineare Beziehung zwischen Oberflächenrauigkeit und Glanz. Mit zunehmender Rautiefe nahm auch der Glanz deutlich ab [Lu et al., 2005]. In einer anderen Studie wurde dieser Zusammenhang bestätigt [Paravina et al., 2004]. Die dabei untersuchten Mikrofüller- und Mikrohybridkomposite

zeigten in Bezug auf arithmetischen Mittenrauwert und Glanz die gleiche Rangfolge, d.h. die Komposite mit den geringsten R_a -Werten zeigten den größten Glanz [Paravina et al., 2004].

Heintze et al. (2006) ermittelten keine positive Korrelation von Oberflächenrauigkeit und Glanz. In ihrer Studie stellten sie fest, dass eine hohe Oberflächenrauigkeit nicht immer mit einem gleich bleibenden niedrigen Glanz in Beziehung steht und umgekehrt. Obwohl der Glanz sich im Verlauf der Politur deutlich erhöht, folgt die Verbesserung der Oberflächenrauigkeit nicht dem gleichen Muster und unterscheidet sich bedeutend von Material zu Material. Daraus wird deutlich, dass der Grad des Glanzes einer polierten Kompositoberfläche neben der Oberflächenrauigkeit auch von der Größe, Form, Zusammensetzung und Verteilung der Füllkörper des Komposites beeinflusst wird.

2.3 Methoden zur Politur

In der Literatur wurden zahlreiche Studien zur Politur von Kompositfüllungen publiziert. Dabei wird die Effektivität unterschiedlicher Poliersysteme an verschiedenen Kompositmaterialien getestet. Die Mehrzahl der Studien bewertet die Poliermethoden unter in vitro Bedingungen an planen Kompositprüfkörpern. Inwieweit die Resultate auf klinische Bedingungen übertragen werden können, ist unbekannt. Jung et al. (2005) beobachtete deutliche Unterschiede zwischen in vitro und in vivo Studien in Bezug auf die Oberflächenrauigkeit von Kompositen nach der Politur. Unter klinischen Bedingungen zeigten sich höhere Rauigkeitswerte als bei experimentellen Untersuchungen. Die erschwerte Zugänglichkeit besonders im Molarenbereich und die Bearbeitung von okklusalen Strukturen sind mögliche Gründe dafür. Dennoch sind in vitro Studien auch weiterhin unverzichtbar. Sie zeigen eine hohe Sensitivität und liefern wertvolle Informationen über die Interaktion von Polierinstrumenten und Kompositoberflächen unter idealen Bedingungen. Zusätzlich müssen in vivo Studien nachweisen, wie die Glättungskapazität von rotierenden Instrumenten unter Bedingungen des oralen Milieus zu bewerten ist [Jung et al., 2005; Türkün, 2004].

Nach dem Legen der Kompositfüllung erfolgt die Ausarbeitung und Politur mit Hilfe rotierender Instrumente. Die anfängliche Grobausarbeitung dient dem Entfernen größerer Überschüsse. Unter Berücksichtigung funktioneller und ästhetischer Aspekte wird beim

anschließenden Konturieren der Füllung die endgültige Form gegeben. Durch das Finieren wird im nächsten Schritt die Füllungsoberfläche vorgeglättet und die Füllungsråder werden definitiv bearbeitet. Die abschließende Politur dient der bestmöglichen Reduktion der verbliebenen Rauigkeiten und verleiht der Oberfläche Hochglanz [Krejci und Lutz, 1984; Türkün, 2004].

In der Literatur gibt es unterschiedliche Empfehlungen für Instrumente zur Ausarbeitung von Kompositen. Einerseits soll der Materialabtrag in relativ kurzer Zeit erreicht werden, andererseits soll die Oberfläche nicht übermäßig zerstört werden, um bei der nachfolgenden Politur mit wenig Aufwand eine glatte Oberfläche zu erreichen. Als starre rotierende Ausarbeitungsinstrumente werden am häufigsten Diamantfinierer unterschiedlicher Körnung und Hartmetallfinierer mit verschiedenen Schneidengeometrien und -zahlen verwendet [Barghi, 2000; Jung et al., 2005; Rzanny et al., 2003; Türkün, 2004]. Diamantfinierer erzielen eine größere Abtragsleistung bei gleichzeitiger stärkerer Aufrauung der Oberfläche als Hartmetallfinierer. Während die Hartmetallinstrumente aufgrund ihrer Schneidenform stets gleichmäßig Material abtragen, greifen die Diamantfinierer die Oberfläche durch die zahlreichen Diamantsplitter punktförmig an und können daher lokalisiert tiefer in das zu bearbeitende Material eindringen [Jung, 1994; Rzanny, 2003].

Zum Polieren von Kompositoberflächen gibt es eine große Auswahl an unterschiedlichsten Polierkörpern. Die Abrasivpartikel befinden sich auf der Außenfläche des Polierkörpers oder sind in die Matrix integriert. Häufig verwendete Abrasivpartikel sind Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , FeO , Siliciumcarbid und Diamantpulver. Damit ein Poliersystem effektiv ist, müssen die Abrasivpartikel härter als die Füllkörper des zu polierenden Komposites sein. Wenn das nicht der Fall ist, entfernen die Poliermittel nur die weiche organische Matrix und lassen die Füllkörper auf der Oberfläche. Die Härte von Aluminiumoxid-Abrasivpartikeln (Härte 9 nach Mohs) ist signifikant größer als die von Siliziumoxidpartikeln (Härte 7 nach Mohs) und allgemein größer als die der meisten Kompositfüllkörper. Poliersysteme, die rein auf Siliziumdioxid als Poliermittel basieren, werden nur für die Politur von Mikrofüllerkompositen empfohlen. Bei Hybridkompositen mit härteren Füllkörpern wurde während des Polierens ein selektives Abtragen der weichen Kompositmatrix beobachtet. Diamantpulver und Siliciumcarbid als Abrasivpartikel erzielen sehr gute Politurergebnisse. Sie weisen eine Härte von 10 nach Mohs auf [Jung und Borchers, 2003; Rzanny et al., 2003].

Als Polierinstrumente werden Gummi- und Silikonpolierer, Polierscheiben, Filzräder, Poliergele und abrasive Bürstchen verwendet [Barghi, 2000; Baseren, 2004; Jung et al., 2005; Rzanny et al., 2003; Türkün, 2004].

Die geringsten Rautiefen wiesen Kompositoberflächen auf, die gegen eine flexible Kunststoffmatrize ausgehärtet wurden [Barghi, 2000/01; Baseren, 2004; Rzanny et al., 2003; Türkün, 2004; Paravina et al., 2004; Yap et al., 2004]. Da Komposite häufig frei aufgebaut werden und nach der Polymerisation noch Formkorrekturen nötig sind, ist eine Ausarbeitung und Politur unerlässlich. Nach der Aushärtung ist die Oberfläche zudem reich an füllstoffarmer organischer Kompositmatrix und weist eine geringe Mundbeständigkeit auf. Die Ausarbeitung und Politur bewirkt eine härtere, verschleißresistentere und folglich eine ästhetischere Oberfläche [Barghi, 2000/01; Baseren, 2004; Türkün, 2004; Paravina et al., 2004; Yap et al., 2004].

Flexible Aluminiumoxidscheiben wurden in sehr vielen Studien als Poliersystem untersucht [Hondrum et al., 1997; Jung et al., 1997, 2002/03; Lu et al., 2003; Marigo et al., 2001; Paravina et al., 2004; Roeder et al., 2000; Rzanny et al., 2003; Silikas et al., 2005; Türkün et al., 2004; Turssi et al., 2000]. Durch die Abstufung in mehreren Körnungen ist sowohl eine Ausarbeitung als auch eine Politur möglich. Sof-Lex Disks bewiesen ein effizientes Finieren und Polieren auf planen und konvexen Oberflächen. Da sie sich über lange Zeiträume sehr gut bewährt haben, gelten sie als klinischer Standard. Für konkave und anatomisch strukturierte Kauflächen sind sie jedoch nicht geeignet [Barghi et al., 2000; Jung et al., 2005; Silikas et al., 2004; Türkün et al., 2004]. Um ein gleichmäßiges Einebnen von Füllstoffen und Matrix zu erzielen, empfiehlt der Hersteller die Anwendung von flexiblen Disks unter Wasserkühlung. Dodge et al. (1991) verglichen die Effektivität von Aluminiumoxidscheiben mit und ohne Wasserkühlung. Die ohne Wasserkühlung bearbeitete Oberfläche war glatter, als die mit Wasserkühlung. Allgemein werden aber nasse Techniken bevorzugt, um Dehydration und Schleiftraumen durch Überhitzung zu vermeiden [Barghi et al., 2000; Dodge et al., 1991]. Der zentrale Metallring der flexiblen Disks kann zu Verletzungen und Verfärbungen der Restaurationsoberfläche führen [Barghi et al., 2000; Eide et al., 1988]. Neben Sof-Lex Disks kommen Super-Snap Disks als flexible Scheiben in einigen Studien zum Einsatz [Baseren et al., 2004; Rzanny et al., 2003; Sectos et al., 1999; Yap et al., 2004]. Diese aluminiumoxidbeschichteten flexiblen Disks enthalten kein Metallzentrum und kein freiliegendes Mandrell. Somit werden Kompositverfärbungen oder Rillenbildungen

ausgeschlossen. Baseren et al. (2004) und Rzanny et al. (2003) verglichen Super-Snap Disks mit anderen Poliersystemen. Die flexiblen Scheiben hinterließen in beiden Untersuchungen geringere Rauheitswerte auf den Kompositoberflächen als die anderen angewendeten Poliersysteme.

Gummi- und Silikonpolierer repräsentieren eine sehr heterogene Gruppe von Polierern. Sie unterscheiden sich in Bezug auf Typ und Größe der Abrasivpartikel und Zahl der Applikationsschritte. Als Abrasivpartikel kommen Aluminiumoxid, Siliziumoxid und Diamantpartikel häufig zum Einsatz. Gummipolierer werden in Form von Spitzen, Kelchen und Scheiben angeboten. Die gebräuchlichste Variante sind die Kelche und Spitzen, sie eignen sich besonders gut für die Okklusalfächen, die mit Polierscheiben schwer zugänglich sind. Vorsicht sollte geboten sein vor zu starkem Druck und vor zu hohen Umdrehungszahlen [Barghi, 2000; Baseren, 2004]. Abhängig vom individuellen Produkt und Komposittyp erstrecken sich die Polierresultate von gut bis ungenügend [Jung et al., 2005].

Jung et al. untersuchte in verschiedenen Studien die Eignung von diamantimprägnierten Filzrädern zur Politur von Kompositoberflächen. Bei vorangegangener Ausarbeitung mit zwei oder mehr Diamant- und Hartmetallfinierern in bestimmten Kombinationen konnten mit dem Filzpolierer stets niedrigere Mittenrauwerte erzielt werden als mit flexiblen Scheiben. Lediglich bei der alleinigen Ausarbeitung mit einem 30 µm Diamantfinierer war die Oberflächenrauigkeit deutlich größer als bei der Verwendung flexibler Disks [Jung, 2002; Jung et al, 1997, 2003]. In einer in vivo Studie wurde der Einfluss von vier Poliersystemen auf strukturierte Okklusalfächen von mehrflächigen Seitenzahnkompositfüllungen untersucht. Dabei erzielten die diamantimprägnierten Filzräder eine vergleichbare Oberflächenqualität wie Silikonpolierer, Polierbürstchen und Diamantpasten [Jung et al., 2005].

Die Qualität von Polierpasten oder -gelen ist abhängig von der Art und der Größe der Abrasivkörper. Als Polierkörper kommen Diamantpartikel oder Aluminiumoxidpartikel zum Einsatz. In verschiedenen Studien wurde die Effizienz von Diamant- und Aluminiumoxidpasten verglichen [Hondrum et al., 1997; Jefferies, 1998; Kaplan et al., 1996; Sen et al., 2002]. Die mit der Diamantpaste bearbeiteten Kompositoberflächen erzielten deutlich glattere Resultate als die mit Aluminiumoxidpasten polierten Oberflächen. In rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wurde deutlich, dass die Diamantpaste die

Füllpartikel und die organische Matrix gleichermaßen abradiert und somit eine glattere Oberfläche erzielt. Ein Poliersystem aus zwei unterschiedlich gekörnten Diamantpasten (Two Striper MPS Gel) wurde in verschiedenen Studien getestet [Hondrum et al, 1997; Kaplan et al, 1996; Jung et al., 2002/05]. Hondrum und Fernandez erzielten mit diesem System an einem Hybridkomposit im Vergleich zu mehreren anderen Poliermethoden die geringsten Rautiefen. Nach Vorbehandlung mit einem Diamant- und Hartmetallfinierer erzielte Jung (2002) mit den Diamantpasten die geringsten Rauigkeitswerte auf der Oberfläche eines Feinpartikelhybridkomposites.

Polierbürstchen entfalten ihre Wirkung durch Siliziumkarbidpartikel, die in die Bürstenfilamente eingearbeitet sind. Krejci et al. (1999) erzielte mit diesen Polierinstrumenten hochglänzende Kompositoberflächen, deren Oberflächenrelief weniger stark eingeebnet wurde als bei der Bearbeitung von Kompositen mit Silikonpolierern und flexiblen Scheiben. Weder Zahn- noch Füllungsoberfläche wurden durch die Bürstchen destruiert [Krejci et al., 1999]. Jung et al. (2005) erreichte in einer in vivo Studie ebenfalls gute Politurergebnisse auf strukturierten Oberflächen von Seitenzahnkompositfüllungen. Die qualitative Beurteilung im Rasterelektronenmikroskop zeigte jedoch vermehrt kantige Übergänge und zerklüftete Areale und somit eine ungenügende Eignung für das Abrunden von Kanten direkter okklusaler Kompositfüllungen. In einer in vitro Studie wurden neben einem Silikonpolierer mit den Polierbürstchen die geringsten R_a -Werte auf planen Kompositflächen festgestellt, wenn auch keine signifikanten Unterschiede zu den anderen Polierverfahren bestanden [Yap et al., 2004]. Gedik et al. (2005) hingegen erzielte mit Polierbürstchen im Vergleich zu Gummipolierern und flexiblen Scheiben rauere Kompositoberflächen.

Aus wirtschaftlichen Gründen entstand die Forderung in der zahnärztlichen Praxis eine glatte, glänzende Füllungsoberfläche in einem Minimum an Zeit und Aufwand zu erreichen. So sind in letzter Zeit auf dem Dentalmarkt einige neue sogenannte „one step“ Poliersysteme erhältlich. Ausarbeitung und Politur sollen mit nur einem Instrument möglich sein. In einigen Studien wurde die Effektivität von mehrstufigen und einstufigen Poliersystemen miteinander verglichen. Ein kürzlich eingeführter diamantimprägnierter Einschnitt-Mikropolierer (PoGo) zeigte in verschiedenen Untersuchungen geringere Rauigkeitswerte im Vergleich zu mehrstufigen Polierverfahren [Paravina et al., 2004; Türkün, 2004/07; Yap et al., 2004]. Die Abstufungen von rau zu fein werden bei dem einstufigen PoGo-System durch

unterschiedlichen und intermittierenden Druck beim Polieren erzielt [Yap et al., 2004]. Im Gegensatz zu den vergleichenden Poliersystemen enthält PoGo Diamantpartikel anstelle von Aluminiumoxid. Diese sind in eine Urethandimethacrylatmatrix des Polierkörpers eingebettet. Ob dies ein möglicher Grund für die guten Politurergebnisse ist, wird diskutiert. In einer aktuellen Studie von Korkmaz et al. (2008) wurde die Effizienz von zwei einstufigen Poliersystemen mit einem traditionellen mehrstufigen System, den flexiblen Disks, auf Nanokompositoberflächen verglichen. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Einschritt- und Mehrschritt- Poliersystemen festgestellt.

2.4 Methoden zur Beurteilung von Kompositoberflächen

Bei der Evaluierung von Oberflächen unterscheidet man zwischen quantitativen und qualitativen Verfahren.

Um die Oberfläche hinsichtlich Geometrie und Rauheit im Mikrometerbereich zu erfassen, muss mit Oberflächenmessgeräten gearbeitet werden, die Oberflächenkenngrößen objektiv ermitteln [Rzanny et al., 2003]. Das am häufigsten eingesetzte quantitative Verfahren zur Rauheitsmessung ist die Profilometrie. Dabei erfolgt die Abtastung der Oberflächen nach dem elektrischen Tastschnittverfahren [DIN 4768]. Mit Hilfe eines Mikrotasters wird die Oberfläche des Prüfkörpers zeilenartig abgetastet. Profilunregelmäßigkeiten führen zu vertikalen Auslenkungen des Mikrotasters, die in einem zweiten Schritt in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Das Signal wird verstärkt, gefiltert und für die Profildarstellung und Kenngrößenermittlung aufgearbeitet [Feinprüf, 1989].

Es gibt zwei verschiedene Arten von Mikrotastern. Mechanische Taster besitzen eine Tastnadel, deren Spitze die Oberfläche unter direktem Kontakt abtastet. Dabei handelt es sich meist um eine Diamantspitze mit unterschiedlichem Durchmesser [Feinprüf, 1989; Jung, 1998]. Je kleiner dieser Durchmesser ist, desto präziser kann die Messung erfolgen. Eine Alternative zu mechanischen Tastern sind optische Mikrotaster, die in Form eines Laserbündels eingesetzt werden. Das Vorliegen von Profilunregelmäßigkeiten führt zu einer Nachfokussierung des Lasers durch eine entsprechende Vertikalbewegung der Tastspitze [Jung, 1998].

Rauhigkeitsmessungen an polierten Oberflächen stellen aufgrund der abnehmenden Rautiefe bestimmte Anforderungen an die Genauigkeit des Mikrotasters. Die Wahl des Tastertyps hat einen entscheidenden Einfluss auf die Größe von gemessenen Rautiefen. Im Gegensatz zum mechanischen Profilometer, untersucht der optische Mikrotaster die Probenoberfläche präziser. Ein Focusdurchmesser von 1 μm ermöglicht die Durchdringung von minimalen Profilunregelmäßigkeiten [Joniot et al., 2000; Jung, 1998]. Der Spitzenradius der Diamantnadel mechanischer Tastsysteme beträgt zwischen 3 und 10 μm . Die Rautiefen polierter Oberflächen liegen jedoch häufig unter diesen Werten. Es ist daher fraglich, inwieweit die ermittelten Werte mit den tatsächlichen übereinstimmen. Jung (1998) verglich in einer Untersuchung die gemessenen Rautiefen zwischen mechanischen und optischen Mikrotastern. Dabei wurde deutlich, dass sich bei Kompositoberflächen mit größeren Profilunregelmäßigkeiten die ermittelten Rauhigkeitswerte zwischen den Tastsystemen nur gering unterschieden. Jedoch mit zunehmender Verringerung der Rautiefen, durch Verwendung feinerer Schleifinstrumente, differierten die von den verschiedenen Tastsystemen gemessenen Rautiefen stark. Der optische Taster ermittelte signifikant größere Rauhigkeitswerte als die mechanischen Taster [Jung, 1998].

Mit quantitativen Verfahren wie der Profilometrie werden Oberflächenkenngößen ermittelt. Dazu zählen der arithmetische Mittenrauenwert R_a , die gemittelte Rautiefe R_z oder die maximale Rautiefe R_{max} [DIN 4768]. In vielen Studien wird die Oberflächenrauigkeit durch den arithmetischen Mittenrauenwert (R_a) beschrieben. R_a , R_z und R_{max} werden als Vertikalparameter bezeichnet. Sie charakterisieren eine Oberfläche nur durch ihre Profilamplituden, so dass noch keine Aussage über die Form der Oberfläche gemacht werden kann [Jung, 1998].

Um die komplexe Oberflächenstruktur detailliert zu beurteilen, sollten horizontale und vertikale Dimensionen berücksichtigt werden. Horizontale Oberflächenkenngößen geben u.a. Auskunft über die Anzahl der Profilunregelmäßigkeiten. Lu et al. (2003) verwendeten den mittleren Abstand der Profilunregelmäßigkeiten (S_m) als horizontalen Oberflächenparameter. S_m beschreibt den arithmetischen Mittelwert der Abstände der Profilunregelmäßigkeiten innerhalb der Bezugsstrecke [DIN 4762]. Das Profillängenverhältnis (LR) ist eine Oberflächenkenngöße, die sowohl horizontale als auch vertikale Oberflächencharakteristika berücksichtigt. Dabei handelt es sich um die gestreckte Länge des Profils in Relation zur Bezugsstrecke. Die gestreckte Länge des Profils ist die

Länge, die sich ergibt, wenn das innerhalb der Bezugstrecke liegende Profil zu einer geraden Linie gestreckt wurde [DIN 4762].

In der Literatur werden mikroskopische Techniken beschrieben, die auch quantitative dreidimensionale Informationen liefern. Silikas et al. (2005) wandten zur Untersuchung der Oberflächenmorphologie von Kompositen die AFM (Atomic force microscopy) und Carlen et al. (2000) die CLSM (confocal laser scanning microscopy) an. Mit Hilfe dieser Techniken werden Auflösungen bis in den Nanometerbereich möglich. Die ermittelten dreidimensionalen Rauigkeitsparameter S_a und S_z entsprechen den profilometrischen Oberflächenkenngrößen R_a und R_z . Durch die hohe Auflösungskapazität sind genauere Auswertungen der Oberflächenrauigkeit im Vergleich zur Profilometrie möglich. Silikas et al. entdeckte positive Übereinstimmung von R_a und S_a Werten. Dieses zeigt, dass trotz der hohen Sensitivität der AFM, die Profilometrie eine schnelle und zuverlässige Methode zur Messung von Rauheitsparametern ist [Silikas et al., 2005]. AFM und CLSM werden häufig zur Beschreibung von Schmelz- und Dentinstrukturen auf kristalliner und molekularer Ebene angewendet [Duschner, 2001]. Für die Beurteilung von polierten Kompositoberflächen sind die apparativ aufwendigen Methoden nicht unbedingt notwendig, da eine Auflösung bis in den Nanometerbereich zu diesem Zweck nicht sinnvoll erscheint. Durch die hohe Auflösung kann nur ein entsprechend kleiner Oberflächenausschnitt ausgewertet werden, der nicht unbedingt repräsentativ sein muss.

Eine weitere Messmethode ist die Interferometrie. Sie ermöglicht eine dreidimensionale Analyse, die das Oberflächenrelief qualitativ und quantitativ erfassen kann. Mit dem Interferometer können Oberflächen ohne Berührung mit hoher räumlicher Auflösung in der Tiefe gemessen werden. Dabei werden Genauigkeiten im Bereich von wenigen Nanometern erreicht. Eine große Anzahl von Messpunkten kann in hoher Geschwindigkeit gewonnen werden [Marigo et al., 2001; Kohles et al., 2004]. Kohles et al. verwendete neben einem Profilometer ein Interferometer zur Analyse der Oberflächenrauigkeit von Implantaten. Dabei wurde festgestellt, dass bezüglich der individuellen Genauigkeit der Messinstrumente das Interferometer dem Profilometer deutlich überlegen ist. Allerdings bei Betrachtung aller Messungen zeigte sich das Profilometer zuverlässiger, da es geringere Abweichungen aufwies [Kohles et al., 2004].

Neben der Messung der Rauigkeit kann die Qualität von Kompositoberflächen durch Bewertung des Glanzes beurteilt werden. Beim Glanz handelt es sich um eine optische Eigenschaft einer Oberfläche, die durch das Vermögen Licht zu reflektieren, gekennzeichnet ist. Glanz wird durch Lichtreflexionsmessungen bestimmt. Auf die Prüfkörperoberfläche wird ein Lichtstrahl unter definiertem Einfallswinkel geleitet. Dieser wird zum einem gestreut und zum anderen reflektiert. Der reflektierte Strahl verlässt die Probenoberfläche im gleichen Winkel zur Senkrechten und wird mit einem Photometer erfasst. Der Reflektormeterwert wird nicht auf die eingestrahlte Lichtmenge bezogen, sondern auf einen schwarzen, polierten Glasstandard mit einer definierten Brechzahl. Eine perfekt glatte Oberfläche reflektiert das Licht in einem Winkel und einer Intensität, welche dem des einfallenden Lichtes entsprechen. Eine Winkelverschiebung oder Verringerung der Intensität deutet auf Rauheit hin. Dabei gilt das Prinzip, dass eine raue Oberfläche einfallendes Licht stärker streut als eine glatte Oberfläche [Hondrum et al., 1997; Paravina et al., 2004]. Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit nimmt also der Glanz ab. Lichtreflexionsmessungen charakterisieren die Gesamtoberfläche. Aussagen über tatsächliche Rautiefen sind nicht möglich. Geringe Veränderungen in der Oberflächenrauigkeit erfassen sie nicht so präzise, wie es Profilometern möglich ist. Diese zeigen im Vergleich zu Lichtreflexionsmessungen eine deutlich höhere Sensitivität. Die alleinige Anwendung von Lichtreflexionsmessungen führt zu einer unzureichenden Beurteilung der Oberfläche [Lu et al., 2005]. In einigen Untersuchungen werden sie als zusätzliche Parameter verwendet [Hondrum et al., 1997; Lu et al., 2005; Paravina et al., 2004; Schmidlin et al., 2002; Silikas et al., 2005].

Um komplexe Oberflächenstrukturen umfassend zu charakterisieren, müssen neben quantitativen Oberflächenrauigkeitsmessungen qualitative Verfahren zum Einsatz kommen. Sie ermöglichen eine Interpretation der quantitativen Ergebnisse. Der Betrachter kann zwischen Rauigkeiten, die vom Schleifinstrument hinterlassen wurden und herstellungsbedingten Fehlern in der Oberfläche wie z.B. Löchern unterscheiden. Profilunregelmäßigkeiten, die durch herausragende Füllpartikel aus der Kompositoberfläche entstehen, werden sichtbar [Türkün, 2004]. Die qualitative Beurteilung erfolgt in wenigen Fällen lichtmikroskopisch und am häufigsten mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM). Im Vergleich zum Lichtmikroskop erreicht das REM ein deutlich höheres Auflösungsvermögen und eine größere Tiefenschärfe. Die Oberfläche eines Gegenstandes kann realistisch und dreidimensional dargestellt werden. Durch eine hohe Vergrößerung wird nur ein kleiner Ausschnitt abgebildet. Deshalb ist bei starker Vergrößerung die Beurteilung

der Gesamtoberfläche nur bedingt möglich. Eine Bewertung über die Ausprägung von Rauigkeiten ist bei qualitativen Verfahren nur näherungsweise möglich und von mehreren Faktoren, wie z.B. dem Neigungswinkel des Präparates, abhängig. Um detaillierte Aussagen über die Beschaffenheit einer Oberflächenstruktur zu erhalten, müssen sowohl quantitative als auch qualitative Messmethoden angewendet werden [Türkün, 2004]. Die Kombination von Profilometrie und REM wird dabei am häufigsten genutzt [Hondrum et al., 1997; Jung, 1997,2002/03/05; Kaplan et al., 1996; Lu et al., 2003; Marigo et al., 2001; Reis et al., 2002; Roeder et al., 2000; Rzanny et al., 2003; Schmidlin et al., 2002; Sen et al., 2002; Türkün, 2004; Wardak et al., 2001].

3 Material und Methode

3.1 Verwendete Komposite

Die vorliegende Untersuchung wurde an vier neu entwickelten Nanokompositen und einem traditionellen Hybridkomposit durchgeführt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über deren Zusammensetzung.

Filtek Supreme (3M Espe)

Das Nanofüllerkomposit enthält nicht-agglomerierte Nanosilizium-Füller mit einer Korngröße von 20 nm und locker vernetzte agglomerierte Zirkonium/Silizium-Nanocluster aus einem Agglomerat von Zirkonium/Silizium Partikeln mit 5-20 nm großen Füllkörpern. Die Clusterpartikelgröße schwankt zwischen 0,6 und 1,4 µm. Der Füllergehalt beträgt 78,5 Gew.-%. Die Kompositmatrix besteht aus Bis-GMA und einer Mischung von UDMA und Bis-EMA. Durch diese Mischung wurde der größte Anteil an TEGDMA ersetzt. Somit enthält Filtek Supreme nur noch eine geringe Menge TEGDMA, die der Regulation der Viskosität dient. Das untersuchte Komposit lag vor als Drehspritzenapplikation zu je 4 g in der Farbe Body B2.

Tetric Evo Ceram (Vivadent Ivoclar)

Tetric Evo Ceram, ein Nanohybridkomposit, kombiniert unterschiedliche Füllergrößen und -arten. Es setzt sich aus keramischen Füllern unterschiedlicher Größe, Präpolymeren, Ytterbiumtrifluoridfüller und sphärischen Mischoxid zusammen. Die Präpolymere bestehen aus keramischem Füller, Monomer und Ytterbiumtrifluorid. Ytterbiumtrifluorid ist ein spezieller Füller, der eine gute Röntgensichtbarkeit garantiert. Quantitativ enthält Tetric Evo Ceram nur einen sehr geringen Anteil an anorganischen Nanopartikeln. Es wurden jedoch gezielt Nano-Additive eingesetzt, wie Nanopigmente und Nanomodifier. Die Matrix besteht neben Bis-GMA und UDMA aus Ethoxyliertem Bisphenol- A- dimethacrylat (EBADMA), welches anstelle des kurzkettigen Monomers TEGDMA eingesetzt wurde. Dies trägt mit zur Reduktion der Polymerisationsschrumpfung bei. Tetric Evo Ceram lag in der Untersuchung als Drehspritzenapplikation zu je 4 g in der Farbe A3 vor.

Ceram X Duo (Dentsply DeTrey)

Das Nanohybridkomposit enthält neben konventionellen Glasfüllern mit einer durchschnittlichen Korngröße im Mikrometerbereich (1,1-1,5 μm), Siliziumdioxid-Nanofüller mit einer Korngröße von 10 nm. Der Großteil der konventionellen Kunststoffmatrix wurde durch methacrylat-modifizierte Polysiloxanpartikel (eine Komponente technischer Keramiken) von nur 2-3 nm Durchmesser ersetzt. Damit konnte der Anteil an herkömmlichen Monomeren auf die Hälfte reduziert werden. Der Füllkörpergehalt beträgt 76 Gew.-%. Ceram X Duo ist im Gegensatz zu Ceram X mono ein System mit zwei unterschiedlichen Transluzenzen. Es dient für Restaurationen im sichtbaren Frontzahn- und Prämolarenbereich. Für die Untersuchung wurden Minikarpulen zu je 0,25 g in der Farbe E2 verwendet.

Premise (Kerr Hawe)

Bei dem Nanohybridkomposit werden drei verschiedene Füller kombiniert und ein Füllkörpergewicht von 84 Gew.-% erreicht. Premise setzt sich aus Bariumglas-Füller (durchschnittliche Korngröße von 0,4 μm), Siliziumdioxid-Nanofüller (durchschnittliche Korngröße von 0,02 μm) und vorpolymerisiertem Füller (30-50 μm) zusammen. Die Vorpolymerisate bestehen aus geringschrumpfendem Resin, Bariumglasfüllern und nicht-agglomerierten Nanofüllern. Die Kunststoffmatrix setzt sich aus EBADMA und TEGDMA zusammen. In der Untersuchung lag Premise als Drehspritzenapplikation zu je 4 g in der Farbe Body A3 vor.

Herculite XRV (Kerr Hawe)

Hierbei handelt es sich um ein herkömmliches Mikrohybridkomposit. Es diente in dieser Studie als Referenzprodukt. Die Füllkörper bestehen zum größten Teil aus konventionellen Glasfüllern mit einer durchschnittlichen Korngröße von 0,3-0,6 μm . Es wird ein Füllkörpergehalt von 78 Gew.-% erreicht. Die organische Matrix setzt sich aus Bis-GMA und TEGDMA zusammen. Herculite wurde in der Drehspritzenapplikation zu je 5 g in der Farbe A3 angewendet.

Tabelle 1 : Zusammensetzung der Komposite

| Material | <i>Ceram X Duo</i> | <i>Filtek™ Supreme</i> | <i>Tetric EvoCeram</i> | <i>Premise</i> | <i>Herculite XRV</i> |
|--|---|---|---|---|---|
| Hersteller | Dentsply DeTrey, Konstanz | 3M Espe, Seefeld | Ivoclar Vivadent, Schaan/ Liechtenstein | KerrHawe, Karlsruhe | KerrHawe, Karlsruhe |
| Füller-zusammensetzung (Art und Größe der Füller) | <ul style="list-style-type: none"> • Ba-Al-Borosilikat-Glas¹ (1,1-1,5µm²) • Methacrylat-funktionalisiertes SiO₂¹ (10nm²) | <ul style="list-style-type: none"> • aggregierte Zirkonium-/Silikafüller-Cluster (0,6 bis 1,4 µm bei primärer Partikelgröße von 5-20 nm) • nichtaggregierte Silikafüller: durchschnittl. (20 nm)³ | <ul style="list-style-type: none"> • Bariumglas-füller, Barium-Al-Silikatglas-füller (0,4-0,7 µm) • Ytterbium-trifluorid, • Misch-oxide • Präpolymere⁵ | <ul style="list-style-type: none"> • Bariumglas – Füller: (durchschnittl. 0,4µm) • Siliziumdioxid-Nanofüller: (durchschnittl. 0,02µm) • Vorpolymerisierte Füller (30-50µm)⁷ | <ul style="list-style-type: none"> • Bedampftes SiO₂, Zinkoxid, TiO₂, Ba-Al-Borosilikatglas (0,3-0,6 µm)⁸ |
| Füllergehalt (Gew.-%) | 76 ² | 78,5 ³ | 82-83 ⁵ | 84 ⁷ | 79 ⁹ |
| Füllergehalt (Vol.-%) | 57 ² | 59,5 ³ | 68 ⁶ | 69 ⁷ | 59 ⁹ |
| Matrix-zusammensetzung | <ul style="list-style-type: none"> • Methacrylat-modifiziertes Polysiloxan • Dimethacrylat-Harz¹ | Bis-GMA, Bis- EMA, UDMA, TEGDMA ^{3,4} | BIS-GMA UDMA EBADMA ⁶ | EBADMA TEGDMA ⁷ | Bis-GMA, TEGDMA, EBADMA ⁸ |
| Charge | 0407002141 | 2AB | F38346 | 406970 | 4-1092 |

¹ Dentsply DeTrey: Produktinformation Ceram X. Dentsply DeTrey, Konstanz (2003).² Dentsply DeTrey: Firmenangaben (2005).³ 3M Espe: Produktinformation Filtek™ Supreme. 3M Espe, Seefeld (2002).⁴ Manhart, 2003⁵ Lendenmann, 2005⁶ Ivoclar Vivadent: Firmenangaben (2005)/ Abteilung Forschung und Entwicklung Schaan⁷ Kerr Corporation: Produktinformation 2005, www.KerrDental.com⁸ Kerr Hawe: Produktinformation Premise. Kerr HaWe, Karlsruhe.⁹ Kaplan et al., 1996

3.2 Herstellung der Kompositprüfkörper

Von jedem Komposit wurden 60 Prüfkörper hergestellt. Dazu wurde eine Hohlform aus Objektträgern angefertigt. In diese Form wurde das Kompositmaterial bis zum Rand appliziert. Dies erfolgte entweder durch die Drehspritze (bei Herculite, Premise, Tetric Evo Ceram, Filtek Supreme) oder durch einen Dispenser (bei den Ceram X Duo- Minikarpulen). Die Aushärtung erfolgte auf der Probenober- und -unterseite zentimeterweise jeweils 40 Sekunden. Das verwendete Lichtgerät war von der Marke Optilux (VCL 401; Demetron

Research Corporation, Ser.Nr. 4220117, Danbury, USA). Mit einem Radiometer (Model 100, P/N 10503, Demetron) wurde eine Ausgangsleistung $> 600 \text{ mW/cm}^2$ sichergestellt.

Nach dem Ausbetten wurde der Kompositblock mit einer Trennscheibe in 7 mm lange Stücke geschnitten. Die entstandenen Prüfkörper hatten eine Grundfläche von $7 \times 7 \text{ mm}$ und eine Dicke von 4 mm. Zur Entfernung der füllstoffarmen Oberflächenschicht wurde jeder Prüfkörper unter Wasserkühlung mit Sandpapier der Körnung 600 Grit (Leco corporation, St. Joseph, USA) 30 Sekunden bearbeitet. Dies geschah mit einem maschinellen Polierrotor (A-250, Jean Wirtz, Düsseldorf) bei 120 U/min. Damit sollte eine Standardoberfläche geschaffen werden. Um Lufteinschlüsse und Porositäten auf der Probenoberfläche auszuschließen, wurden die Prüfkörper unter dem Stereomikroskop (Stemi SV 6, Snv. – Nr. 138824 00/90, Zeiss, Göttingen) untersucht. Bei fehlerhaftem Zustand wurde der Prüfkörper verworfen und durch einen neuen Prüfkörper ersetzt. Im Folgenden wurden die Kompositproben 24 Stunden in einem Hygrophor bei Zimmertemperatur gelagert.

3.3 Instrumente für die rotierende Bearbeitung

3.3.1 Ausarbeitungsinstrumente

Vor der Politur erfolgte die Ausarbeitung der Prüfkörper durch zwei unterschiedliche Diamantfinierer (DF) und einen Hartmetallfinierer (HMF, Tab. 2).

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Ausarbeitungsinstrumente

| Typ | Diamantfinierer | Diamantfinierer | Hartmetallfinierer |
|---|--|--|--|
| lfd.-Nr. | 1 | 2 | 3 |
| Hersteller | Komet/Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo | Komet/Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo | Komet/Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo |
| Bezeichnung | 806 314 290 514 014 | 806 314 290 504 014 | 500 314 290 072 014 |
| Durchschnittliche Korngröße/ Schneidenzahl | 24-40 μm | 15-30 μm | 12-blättrig, rechts |
| Farbcode | rot | gelb | rot |
| Drehzahl U/min | 40000 | 40000 | 40000 |

Die Instrumente hatten eine zylindrische Form mit einer konisch verlaufenden Spitze. Die Diamantfinierer wiesen eine Körnung von durchschnittlich 30 µm (DF 30, lfd. Nr. 1) und durchschnittlich 20µm (DF 20, lfd. Nr. 2) auf. Der Hartmetallfinierer (HMF, lfd. Nr. 3) zeigte 12 Schneiden rechtsdrehend.

3.3.2 Polierinstrumente

Für die Politur wurden drei verschiedenen Polierverfahren angewandt (Tab. 3). Jedes Polierinstrument wurde nur einmal benutzt.

Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Polierinstrumente

| Typ | Sof-Lex | Astropol | Opti Shine | Enhance / PoGo |
|---------------------------|---|---|--|---|
| lfd. Nr. | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Hersteller | 3M ESPE, Seefeld | Ivoclar Vivadent AG FL-9494 Schaan/Liechtenstein | KerrHawe SA 6934 Bioggio/Switzerland | Dentsply DeTrey, Konstanz |
| Order Nr. | 1982 M 1982 F 1982 SF | 557617 (F) 557619 (P) 557623 (HP) | 70402660 | 662020X |
| Abrasiv-partikel | Al ₂ O ₃ ¹ | Siliciumcarbid, Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , FeO Diamantstaub (HP) ^{2,3} | Siliciumcarbid ⁴ | <u>Enhance Finishing Cups:</u> Al ₂ O ₃ Siliziumdioxid ⁶ <u>PoGo Polishing Cups:</u> Feines Diamantpulver Siliciumdioxid ⁶ |
| Abrasiv-partikel Größe | M 29µm F 14µm SF 5µm ¹ | F 3/ 36, 5 µm P 12, 8 µm HP 3,5 µm ^{2,3} | 5 µm ⁵ | Enhance Finishing: 40µm ⁷ PoGo Polishing : 7 µm ⁸ |
| Form | Flexible Disk | Kelch | Bürstchen | Kelch |
| Drehzahl U/min | 3000 | 8500 | 5000 | 8000 |
| Wasser- kühlung | ja | Ja | nein | nein |

¹ Jung, 1998

² Ivoclar Vivadent: Produktinformation Astropol. Ivoclar Vivadent, Schaan/Liechtenstein (2001).

³ Jung, Bruegger, Klimek, 2003

⁴ Kerr HaWe: Produktinformation Opti Shine. Kerr HaWe, Bioggio/Switzerland.

⁵ Jung et al., 2005

⁶ Dentsply DeTrey: Produktinformation PoGo. Dentsply DeTrey, Konstanz (2003).

⁷ Türkün, 2004

⁸ basiert auf Messung aus eigener REM Studie

- Sof-Lex, 3M Espe (lfd. 4)

Die Politur mit flexiblen Sof-Lex Disks gilt als akzeptierter klinischer Standard und war deshalb als Referenz für die übrigen Polierverfahren vorgesehen.

Sof-Lex Disks sind einseitig mit Aluminiumoxidpartikeln beschichtet. Sie werden mit Durchmessern von 9,5 mm und 12,5 mm angeboten. In der vorliegenden Studie wurde der Durchmesser von 12,5 mm angewendet. Die Öffnung im Scheibenzentrum dient der Montage auf ein Stahlmandrell. Die flexiblen Scheiben sind in vier verschiedenen Korngrößen mit entsprechender Farbkodierung erhältlich. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die drei feineren Abstufungen eingesetzt (medium: Korngröße ca. 29 μm , fein: Korngröße ca. 14 μm , superfein: Korngröße ca. 5 μm).

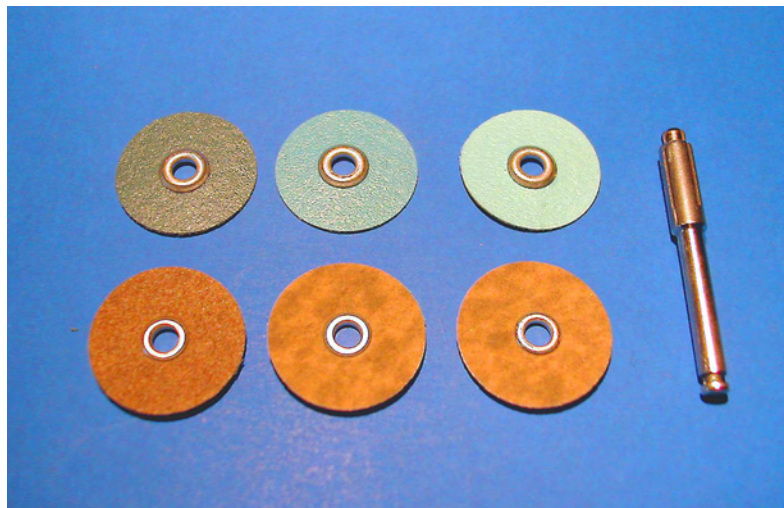


Abb. 1: Sof-Lex Disks (3M Espe) in drei Korngrößen

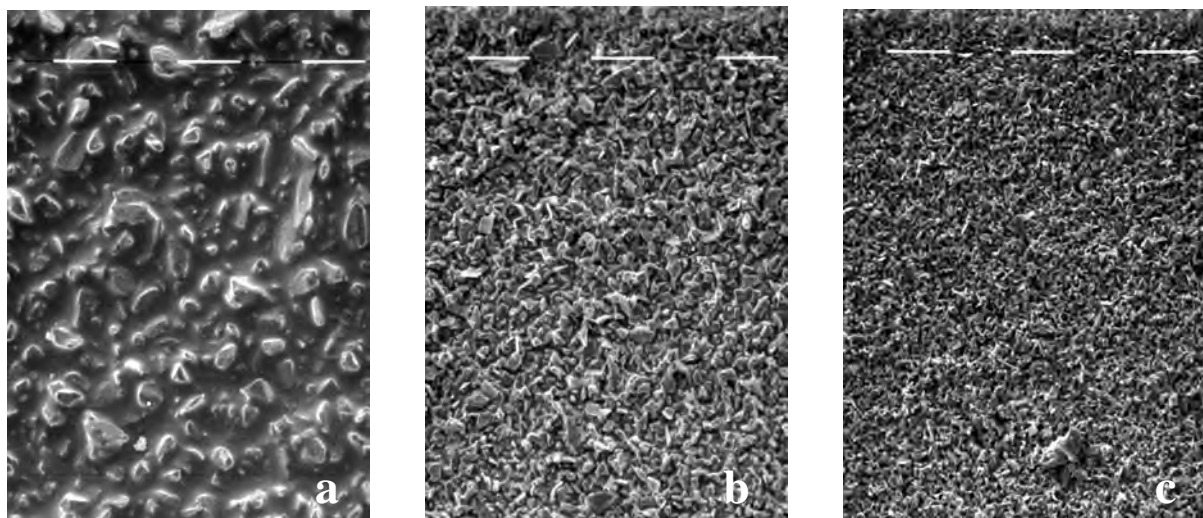


Abb. 2: REM-Aufnahme der Arbeitsseiten der drei unterschiedlich gekörnten Sof-Lex Disks (a: medium, b: fein, c: superfein). Die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 100 μm .

- Astropol, Ivoclar Vivadent (lfd. Nr. 5)

Das Poliersystem Astropol ist dreifach abgestuft und wird in vier verschiedenen Formen angeboten. Es stehen kleine und große Flamme, Kelch und Scheibe zur Verfügung. In der Studie wurde der Kelch verwendet (Abb. 3). Die Schäfte bestehen aus rostfreiem Stahl. Astropol ist autoklavierbar und zum mehrmaligen Gebrauch gedacht. Astropol gehört zur Gruppe der Gummipolierer, die Matrix besteht aus Kautschuk. Die drei Körnungsabstufungen sind durch unterschiedliche Farbkodierungen gekennzeichnet. Astropol F (grau, Korngröße 36,5 μm) dient zum Finieren, mit Astropol P (grün, Korngröße 12,8 μm) wird poliert und Astropol HP (altrosa, Korngröße 3,5 μm) wird zur Hochglanzpolitur eingesetzt.

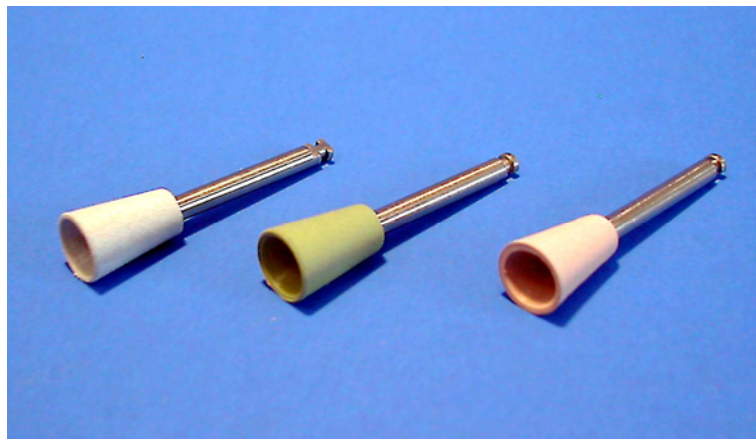


Abb. 3: Astropol (Ivoclar Vivadent)

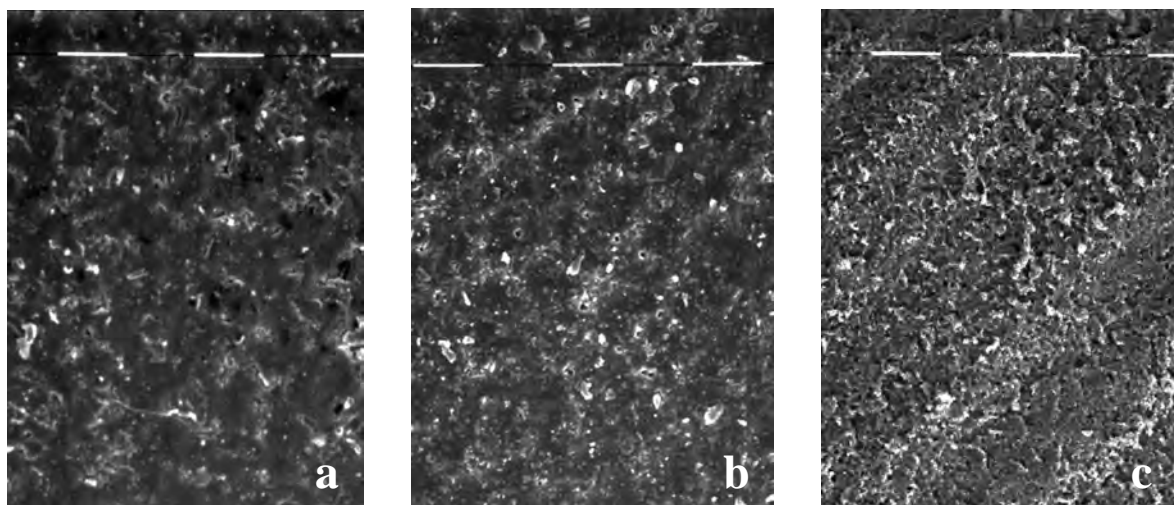


Abb. 4: REM-Aufnahme der Abrasivpartikel des Astropol Poliersystemes (a-F/grau, b-P/grün, c-HP/altrosa). Die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 100 μm .

Die in die Matrix eingebetteten Abrasivpartikel bestehen aus Siliziumkarbid, Aluminiumoxid, Titandioxid und Eisenoxid. Astropol HP enthält zusätzlich Diamantpartikel für den abschließenden Hochglanz. Abbildung 4 zeigt die in die Matrix eingebetteten Abrasivpartikel in der rasterelektronenmikroskopischen Darstellung.

- OptiShine, Kerr Hawe (lfd. Nr. 6)

Hierbei handelt es sich um ein Polierbürstchen in Form eines Kelches. Die konkav geformten Bürstchen (Abb. 5) eignen sich gut für die Politur von konvexen Flächen, Zahnzwischenräumen und Kauflächen. Die Enden der externen Borsten sind am äußeren Bürstchenrand angeordnet und rotieren daher mit einer verhältnismäßig höheren Geschwindigkeit, was eine wirksamere Füllungspolitur ermöglichen soll. OptiShine ist mehrfach anwendbar und wird nach Gebrauch mit Ultraschall gereinigt und im Autoklaven sterilisiert. Die Borstenfilamente bestehen aus Kunststoff (Abb. 5). Die Polierwirkung ergibt sich durch die in den Borstenfilamenten integrierten Polierpartikel aus Siliziumkarbid. Somit ist keine Polierpaste erforderlich. Die Abrasivpartikel haben eine Korngröße von $5\mu\text{m}$. Der Polierer wird nur in einer Abstufung angewendet.

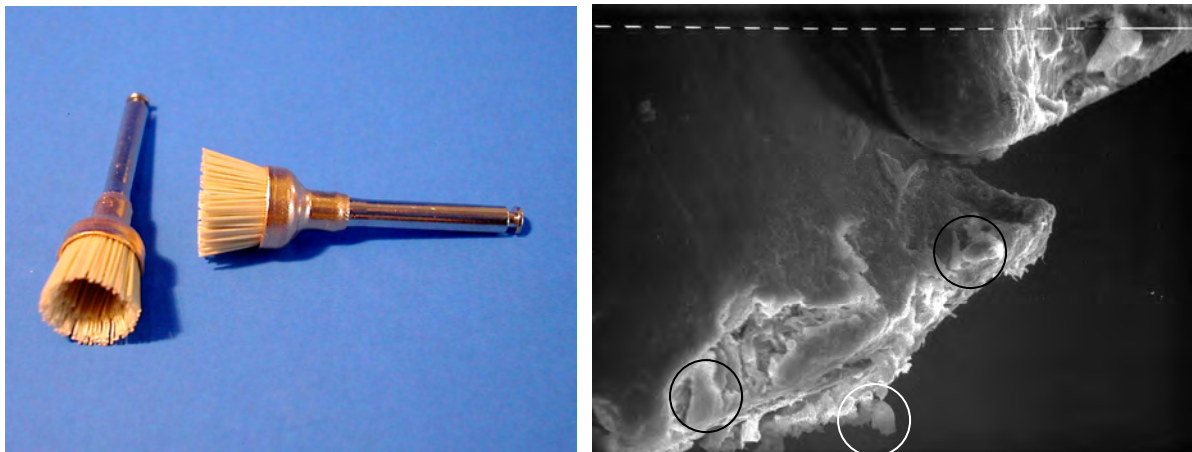


Abb. 5: links: OptiShine (KerrHawe) Polierbürstchen mit konkaver Form; rechts: REM-Aufnahme der Borstenfilamente. Kreise kennzeichnen die Abrasivpartikel (die Länge eines horizontalen Balkens entspricht $10\mu\text{m}$)

- Enhance Finishing & PoGo Polishing System, Dentsply (lfd. Nr. 7)

Hierbei handelt es sich um ein zweistufiges Polierverfahren bestehend aus den Enhance-Finishers für die Vorpolitur und den PoGo-Polishers für den Hochglanz. Das Poliersystem bietet drei verschiedene Formen: Scheibe, Kelch und Spitze. Für die Studie wurde der Kelch verwendet. Die Polieraufsätze sind auf einem Kunststoffmandrell vormontiert und dienen nur

für den einmaligen Gebrauch. Die Abrasivpartikel sind in eine Kunststoffmatrix, welche aus polymerisiertem Urethandimethacrylat besteht, eingebettet. Die Abrasivpartikel der Enhance-Finishers bestehen aus Aluminiumoxid und Siliziumoxid und haben eine Korngröße von 40 µm. Bei den PoGo-Polishers kommen Diamantpulver und Siliziumdioxid als Abrasivpartikel zum Einsatz.

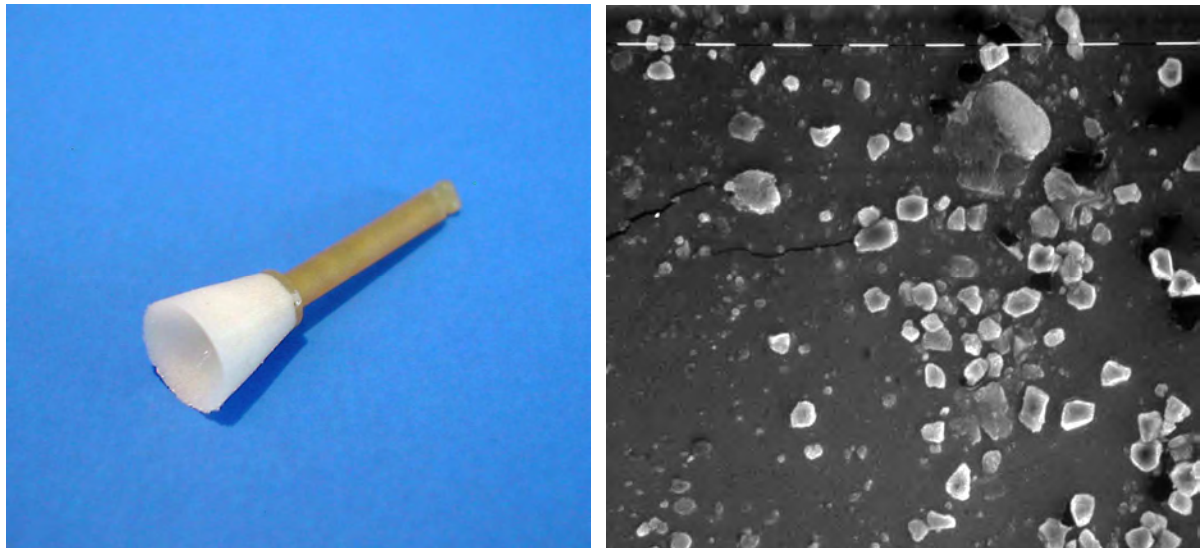


Abb. 6: links: Enhance-Finisher (Dentsply); rechts: REM-Aufnahme der in die Matrix eingebetteten Abrasivpartikel (die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 10 µm)

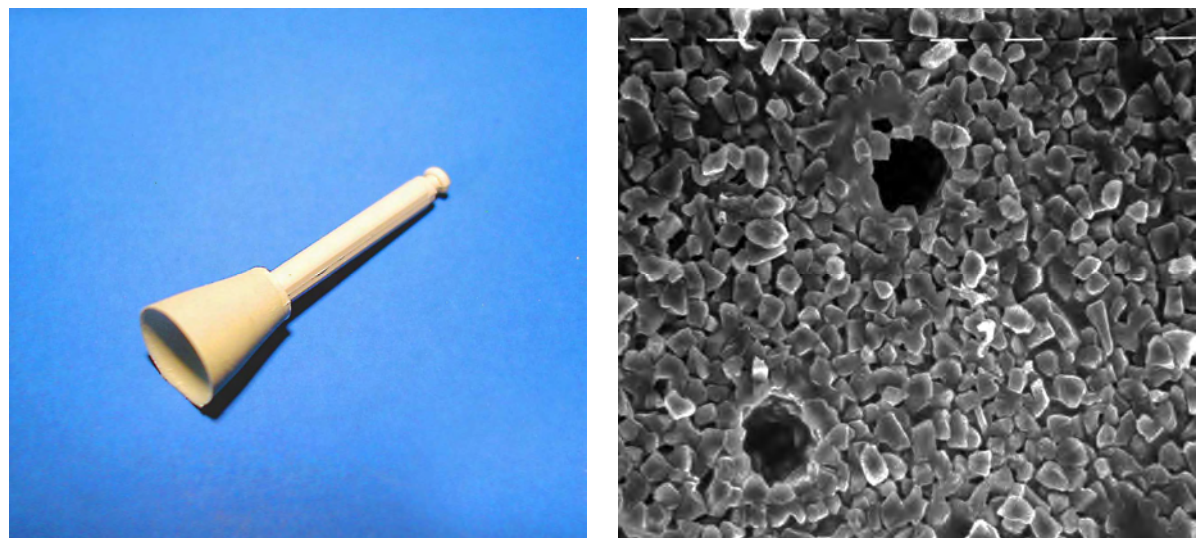


Abb. 7: links: PoGo-Polisher (Dentsply); rechts: REM-Aufnahme der in die Matrix eingebetteten Abrasivpartikel (die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 10 µm)

3.4 Bearbeitung der Kompositprüfkörper

Um eine geeignete Vorbehandlung für die Polierverfahren zu ermitteln, wurde jedes der Polierverfahren mit einem der drei Ausarbeitsverfahren kombiniert. Von den 60 hergestellten Prüfkörpern pro Komposit wurden jeweils 15 Prüfkörper als vergleichender klinischer Standard mit Sof-Lex Disks bearbeitet. Die übrigen 45 Proben von jedem Komposit wurden drei Gruppen mit je 15 Proben randomisiert zugeteilt, welche dem folgenden Finierprotokoll unterlagen:

Ausarbeitsverfahren 1 (AV1):

Verwendung eines Diamantfinierers mit einer durchschnittlichen Korngröße von 30 µm (DF 30, lfd. Nr. 1). n = 15

Ausarbeitsverfahren 2 (AV2):

Zweistufiges Verfahren durch aufeinander folgende Anwendung von zwei unterschiedlich gekörnten Diamantfinierern (DF 30/ DF 20, lfd.Nr.1 und 2). n = 15

Ausarbeitsverfahren 3 (AV3)

Zweistufiges Verfahren durch aufeinander folgende Anwendung eines 30 µm Diamant- und eines Hartmetallfinierers (DF 30/ HMF, lfd.Nr.1 und 3). n = 15

Für die Ausarbeitung wurde ein rotberingtes Winkelstück (24 LM Intramatic Lux 2, KaVo, Biberach-Riss) mit Wasserkühlung verwendet. Die Leerlaufdrehzahl der Instrumente betrug 40000 U/min und wurde mit dem elektronischen Meßgerät Moviport C117.11 (Braun, Waiblingen) überprüft. Die Diamant- und Hartmetallfinierer wurden nach fünfmaligem Gebrauch verworfen.

Anschließend wurden die 15 Prüfkörper der jeweiligen Ausarbeitsverfahren in drei Untergruppen mit n = 5 Prüfkörpern unterteilt. Die Proben der ersten Untergruppe wurden mit Astropol, die der zweiten Untergruppe mit OptiShine und die der dritten Untergruppe mit Enhance/PoGo poliert.

Für die Politurinstrumente kam ein blauberingtes Winkelstück (Intramatic Lux 20LH, mit dem Kopf 68LH, KaVo) zum Einsatz. Die angewendeten Drehzahlen richteten sich nach den Herstellerangaben (Tab. 2 und 3). Jedes Polierinstrument wurde nach einmaligem Gebrauch verworfen.

Die Prüfkörper wurden manuell 30 Sekunden finiert und 30 Sekunden poliert. Die Ausarbeitung und Politur erfolgte nach einem randomisierten Verfahren. Dies betraf sowohl die Komposite als auch die Bearbeitungsmethoden. Sowohl die Komposite als auch die Bearbeitungsmethoden wurden zu gleichen Teilen auf zwei Personen aufgeteilt. Beide Testpersonen bearbeiteten jeden Werkstoff gleich häufig mit allen Bearbeitungsmethoden. Während der manuellen Oberflächenbehandlung war der Komposittyp unbekannt.

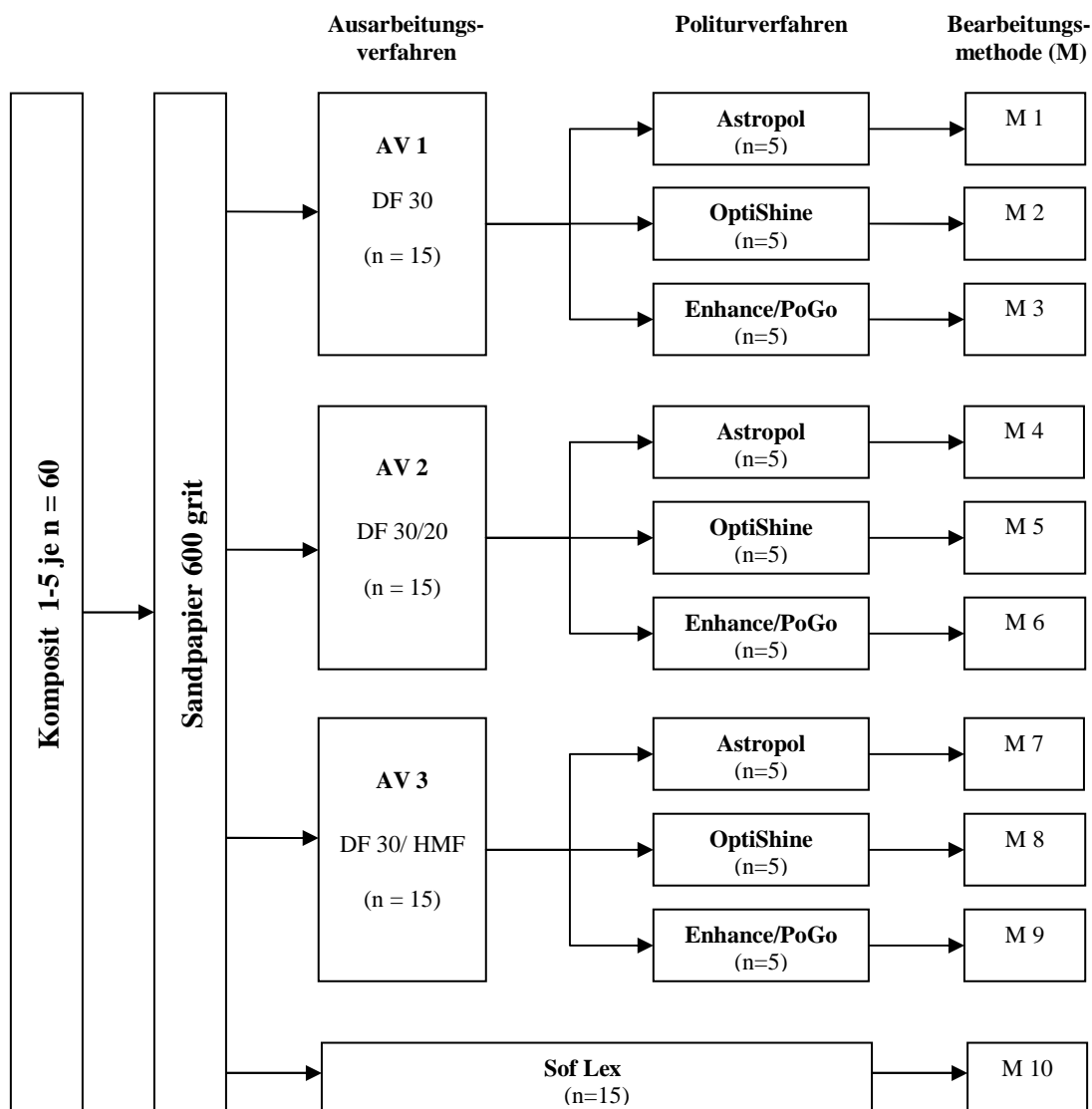


Abb. 8: Bearbeitungsmethoden 1-10 im Überblick (DF 30 = Diamantfinierer 30µm, DF 20 = Diamantfinierer 20 µm, HMF = Hartmetallfinierer)

3.5 Evaluation der untersuchten Kompositoberflächen

Die Bewertung der polierten Prüfkörperoberflächen erfolgte quantitativ durch ein Profilometer. Für eine qualitative Oberflächenbewertung wurde das Rasterelektronenmikroskop eingesetzt.

3.5.1 Quantitative Beurteilung mittels Profilometer

Die Rauigkeitsmessung erfolgte nach dem elektrischen Tastschnittverfahren (DIN 4772) und wurde mit dem Perthometer S8P (Mahr GmbH, Göttingen) durchgeführt. Der Oberflächenmessplatz besteht aus einem Mikrotaster, einem Vorschubgerät und einer zentralen Auswerteeinheit (Perthometer S8P). Ein Mikroprozessor ermöglicht das zeitgleiche Aufzeichnen des Profils auf dem Bildschirm und die unmittelbare Ausgabe aller gewünschten Kennwerte im Anschluss an die Messung.

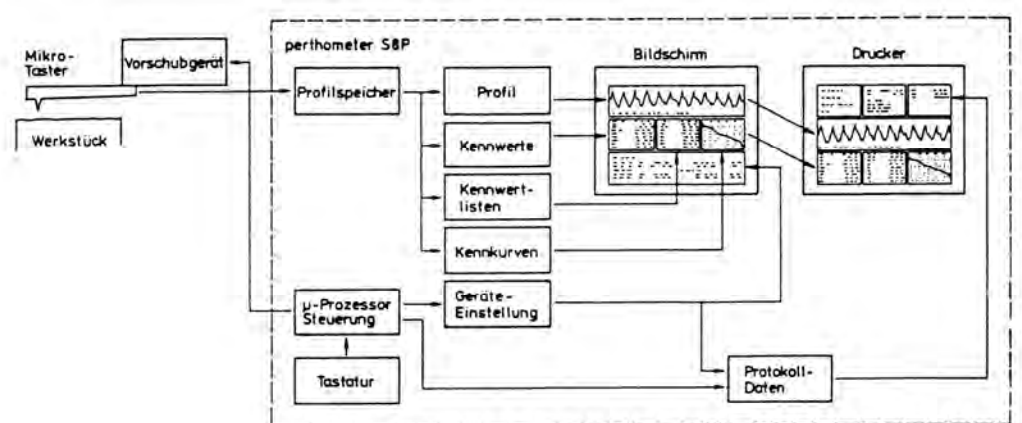


Abb. 9: Funktionsschema des Perthometers S8P (Feinprüf, 1998)

Der mechanisch mit dem Vorschubgerät verbundene Mikrotaster tastet mit konstanter Geschwindigkeit das Profil der Oberfläche entlang einer Schnittlinie ab (Tastschnittverfahren) und übermittelt die Messwerte dem Perthometer S8P. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 0,1 mm/s. Die zentrale Rechneinheit S8P verarbeitet das Messsignal und ermöglicht die graphische Darstellung der abgetasteten Oberfläche und die Ausgabe von verschiedenen Oberflächenkennwerten und Rauigkeitsparametern. Über einen integrierten Drucker wurden Profildarstellungen und Messwertprotokolle ausgedruckt. Der gesamte Messplatz war auf einem schwingungsgedämpften Tisch (VW-3036-OPT-0330,

Newport, Fountain Valley, USA) gelagert, um die Rauheitsmessungen vor störenden Schwingungen und Erschütterungen zu schützen.

Das Abtasten der Oberfläche erfolgte mit einem Lasertaster (Focodyn, Rodenstock, München), welcher eine berührungslose Erfassung der Oberfläche möglich machte. Das Infrarotlicht der Laserdiode gelangt über einen speziell geführten Strahlengang auf das Mikroobjektiv, wo es gebündelt wird. Das Lichtbündel trifft 0,9 mm unterhalb der Austrittsöffnung mit einem Messfleckdurchmesser von ca. 1 µm auf die Prüfkörperoberfläche. Vom Mikroobjektiv wird das von der Oberfläche reflektierte Licht erfasst und als Signal zum Fokusedetektor weitergeleitet. Dieses Signal steuert im Fokusedetektor einen im Tastergehäuse integrierten Linearmotor so, dass der Fokus auf dem abgetasteten Oberflächenpunkt liegt. Durch eine Vertikalbewegung der Tastspitze fokussiert der Laser bei Profilunregelmäßigkeiten nach. Die Auslenkung der Tastspitze wird über ein Wegmesssystem in ein elektrisches Signal umgewandelt und zur Messwertermittlung im Pertometer S8P weiterverarbeitet (Feinprüf, 1998).

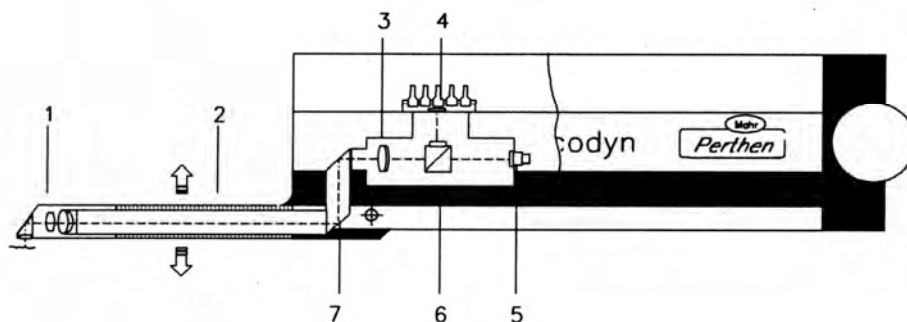


Abb. 10: Schematischer Aufbau eines optischen Mikrotasters (Feinprüf, 1998);
1 Mikroobjektiv, 2 Messhebel, 3 Kollimator, 4 Fokusedetektor, 5 Laserdiode, 6 Strahlteiler, 7 Prisma

3.5.1.1 Messbedingungen (gemäß DIN 4768)

- Taststrecke (L_T) = 1,75 mm

Die Taststrecke (L_T) ist die gesamte Strecke, die vom Mikrotaster auf der Werkstückoberfläche zurückgelegt wird. Sie setzt sich aus Vorlaufstrecke, fünf Einzelmessstrecken (L_E) und Nachlaufstrecke zusammen. Die Vorlaufstrecke dient zum Abklingen anfänglicher Einschwingvorgänge.

- Gesamtmessstrecke (L_M) = 1,25 mm / Einzelmessstrecke (L_E) = 0,25 mm

Die fünf Einzelmessstrecken (L_E) ergeben die Gesamtmessstrecke (L_M). Sie ist der Teil des Rauheitsprofils, der zur Messwertermittlung herangezogen wird. Die Länge der Gesamtmessstrecke (L_M) entspricht der Länge von fünf Grenzwellenlängen (λ_C). Die Grenzwellenlänge und die Einzelmessstrecke sind stets gleich lang zu wählen.

- Vertikalbereich (VB) = 62,5 μm

Der Vertikalbereich (VB) beschreibt den Umfang des Messbereiches. Um die hohe Auflösung der Messwertverarbeitung auszunutzen, sollte der Vertikalbereich möglichst klein gewählt werden, aber noch groß genug, um alle Werte zu erfassen. Die Werte für den Vertikalbereich richten sich nach der Empfindlichkeit des Mikrotasters.

- Grenzwellenlänge (λ_C) = 0,25 mm

Das Filtern langwelliger Profilanteile, die Rauigkeiten überlagern könnten, erfolgte mit einem Gauß-Filter. Profilfilter bewirken, dass einerseits langwellige Anteile des Istprofils nur teilweise bzw. gar nicht in das Rauheitsprofil übernommen werden und andererseits kurzwellige Rauheitsanteile möglichst geringfügig in das Welligkeitsprofil übernommen werden. Die Filtercharakteristik wird durch die Grenzwellenlänge angegeben. Die Filtercharakteristik für das Rauheitsprofil entspricht der eines Hochpassfilters, der niederfrequente oder langwellige Signale entsprechend seiner Charakteristik dämpft und höherfrequente oder kurzwellige Signale durchlässt.

3.5.1.2 Parallelaufzeichnung

Durch die Parallelaufzeichnung wird eine näherungsweise dreidimensionale, topographische Darstellung der Oberfläche möglich (Abb. 12). Es erfolgt die Aufzeichnung von mehreren parallelen äquidistanten Tastschnitten des Prüflings. Dazu muss eine Querverschiebung des Prüfkörpers erfolgen. Dies geschieht mit einer Antriebseinheit, die an einen Kreutztisch, der zur Aufnahme des Prüflings dient, montiert ist. Die Antriebseinheit wird durch das Perthometer S8P gesteuert. Zur Darstellung wurde eine Parallelprojektion von $0/45^\circ$ (Kavaliersperspektive) verwendet.

Es wurden neun parallele Messungen pro Prüfkörper durchgeführt. Die x-Taststrecke (L_T) betrug 1,75 mm. Die Y-Schrittlänge (D_Y) ist die Länge der y-Taststrecke dividiert durch die

Anzahl der y-Tastschritte. Sie betrug 0,219 mm und somit war die y-Taststrecke (L_Y) 1,75mm lang. Aus L_Y und der Gesamtmessstrecke (L_M) ergab sich eine abgetastete Fläche von 2,19 mm². Die Tastrichtung erfolgte senkrecht zur Orientierung der Riefen auf der Prüfkörperoberfläche.

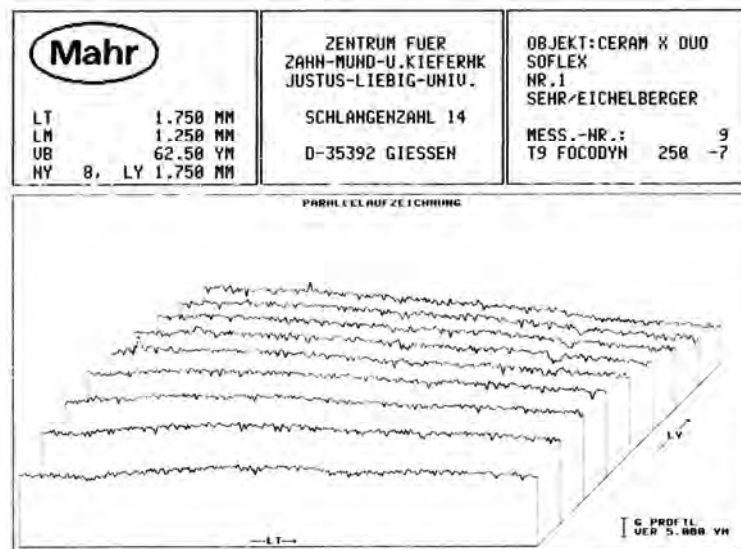


Abb. 11: Parallelaufzeichnung nach neun Einzelmessungen einer Ceram X Duo-Oberfläche nach Bearbeitung mit Sof-Lex Disks

3.5.1.3 Vorbereitungen der Prüfkörper

Im Anschluss an die Politur wurden die Prüfkörper mit klarem Wasser abgespült und danach mit 98%-igen Alkohol unter Verwendung von Watteträgern abgetupft. Anschließend wurden sie mit einem Wasserstrahl abgesprüht und im Luftstrom getrocknet.

3.5.1.4 Ermittelte Rauheitskenngrößen (gemäß DIN 4768)

Arithmetischer Mittenrauwert (R_a)

Der arithmetische Mittenrauwert ist der arithmetische Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie innerhalb der Gesamtmessstrecke (L_M).

Profillängenverhältnis gemäß DIN 4762 (LR)

Das Profillängenverhältnis ist eine dimensionslose Größe, die das Verhältnis wiedergibt zwischen der zu einer Linie ausgezogenen, vorher aus Profilerhebungen und -vertiefungen

bestehenden, Oberflächenkennlinie und der Länge der Messstrecke. Bei einer ideal glatten Oberfläche würde $LR = 1$ betragen, da die Länge der Messstrecke und die Länge der Oberflächenkennlinie gleich ist. Je größer die Rauigkeiten desto größer wird die Länge der Oberflächenkennlinie und damit auch LR.

3.5.1.5 Prüfstatistische Auswertung

Unterschiede zwischen den Kompositmaterialien und den Bearbeitungsmethoden wurden mit Hilfe der zweifaktoriellen Varianzanalyse und Post-Hoc-Tests nach Scheffé beurteilt. Die tabellarische Zusammenfassung der Messwerte ist im Anhang vermerkt.

3.5.2 Qualitative Beurteilung mittels Rasterelektronenmikroskop

Zur Ergänzung der quantitativen Beurteilung erfolgt eine qualitative Evaluierung mit dem Rasterelektronenmikroskop PSEM 500 (Fa. Philipps, Eindhoven, Niederlande). Die wichtigsten Bestandteile des Rasterelektronenmikroskopes sind eine Elektronenquelle zur Erzeugung der Elektronen, sowie magnetische Linsen, die den Elektronenstrahl auf das Objekt fokussieren und der Detektor. Das Objekt muss sich im Hochvakuum befinden, da die Elektronen von den Luftmolekülen gestreut werden. Schließlich wird noch eine Vorrichtung zur Auswertung der mit den Elektronen abgetasteten Bilder benötigt. Ein Rastergenerator sorgt dafür, dass der Elektronenstrahl zeilenförmig über das Objekt geleitet wird. Das REM tastet die Objektoberfläche in einem Raster ab. Die auftreffenden Primärelektronen können direkt von der Objektoberfläche gestreut werden oder die Emission von Sekundärelektronen aus der Probenoberfläche bewirken. Der Detektor registriert die Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Probe und wandelt sie in ein Videosignal um. Die Anzahl der detektierten Elektronen bestimmt dann die Intensität der Lichtpunkte auf dem Bildschirm.

3.5.2.1 Auswahl und Vorbereitung der Prüfkörper

Aus jeder Gruppe der Komposite und Bearbeitungsmethoden wurden nach dem Zufallsprinzip zwei Prüfkörper ausgewählt. Insgesamt wurden 100 Proben rasterelektronenmikroskopisch untersucht.

In der Vorbereitung wurden die Prüfkörper erneut mit Alkohol (98%) gereinigt und anschließend mit einem Wasserstrahl abgesprüht und im Luftstrom getrocknet. Mit Hilfe des Spezialklebers Leit-C nach Göcke (Neubauer Chemikalien, München) wurden die Prüfkörper auf speziellen Proben Tellern befestigt.

Da die Untersuchungsobjekte eine leitende Oberfläche besitzen müssen, wurden sie durch Sputtern mit einem elektrisch leitenden Überzug versehen. Mit einem Druckluftspray wurden noch vorhandene Staubreste entfernt. Danach erfolgte die Bedampfung mit einer Goldschicht. Das Sputtern erfolgte in der Sputteranlage Typ SCD 040 (Balzers Union, Liechtenstein). Dabei wurden folgende Einstellungen ausgewählt:

- Stromstärke: 20 mA
- Leerlaufspannung 180 V
- Fluten der Sputterkammer mit Stickstoff
- Temperatur 24,5°C
- Zeitdauer: 4 Minuten

3.5.2.2 Anfertigungen der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen

Die Proben Tellern wurden so auf einem Probeschleiten montiert, dass alle Präparate auf gleicher Höhe justiert waren.

Die rasterelektronischen Aufnahmen erfolgten unter folgenden Einstellungen:

- Spannung: 25 KV
- Emission: 2 μ A
- Blende: 400 μ m
- Spot-Size: 0,125 μ m
- Line-Time: 16 ms
- Monitorvergrößerung: 80-fach

Von jeder Prüfkörperoberfläche wurden Aufnahmen in 80-facher Vergrößerung mit Hilfe eines Schwarz-Weiß Negativfilmes (T-MAX 100, Kodak Professional, Nürnberg) durchgeführt. Von den Negativen wurden photographische Abzüge der Größe 12 x 16 cm hergestellt.

3.5.2.3 Auswertungen der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen

Anhand der Abzüge war die qualitative Beurteilung der Probenoberflächen möglich. Mit Hilfe eines aufgelegten Rasters erfolgte eine Unterteilung jeder einzelnen Aufnahme in 96 rechteckige Felder (2 cm x 1 cm).

Jedes Feld wurde nach folgenden Kriterien beurteilt:

- Merkmal 1: *glatt/homogen* (keine Bearbeitungsspuren erkennbar)
- Merkmal 2: *mittlere Rauigkeiten* (geringe Bearbeitungsspuren und einzelne Unregelmäßigkeiten sichtbar)
- Merkmal 3: *starke Rauigkeiten* (zahlreiche oder stark ausgeprägte Riefenbildung)
- Merkmal 4: *Oberflächendestruktionen* (Profilunregelmäßigkeiten erscheinen größer und tiefer als die Korngröße des Schleifkörpers, die Oberflächenkontinuität ist unterbrochen)

Bei der Auswertung war die Bearbeitungsmethode und Kompositgruppe unbekannt, sie wurde verblindet durchgeführt. Die Beurteilung erfolgte durch zwei Personen, die unabhängig voneinander alle vorhandenen Abzüge auswerteten.

4 Ergebnisse

4.1 Quantitative Beurteilung

Eine zweifaktorielle Varianzanalyse zeigte hinsichtlich beider Oberflächenparameter R_a und LR, dass die Oberflächenrauigkeit nach dem Polieren signifikant durch die Kompositmaterialien ($p<0,001$), die Ausarbeitungsverfahren ($p<0,001$) und die Poliermethoden ($p<0,001$) beeinflusst wurde. Zudem waren signifikante Wechselwirkungen zwischen den Ausarbeitungsverfahren und den Poliermethoden nachweisbar ($p<0,001$). Die Poliermethoden wirkten sich also in Abhängigkeit von den Ausarbeitungsverfahren unterschiedlich auf die Politurergebnisse aus.

Anzumerken ist, dass die Politur mit OptiShine nach Vorbehandlung mit einem 30 μm Diamantfinierer (Bearbeitungsmethode 2) die mit Abstand größten gemessenen Rautiefen hinterließ ($R_a=1,756 \mu\text{m}$). Die hochsignifikanten Unterschiede zu den anderen Bearbeitungsmethoden waren so deutlich, dass sie die Power der statistischen Analyse negativ beeinflussten. Aus diesem Grund wurde die Methode 2 aus der prüfstatistischen Auswertung exkludiert.

4.1.1 Vergleichende Betrachtung der Komposite anhand des arithmetischen Mittrauwertes (R_a)

Abbildung 12 veranschaulicht die durchschnittlichen arithmetischen Mittenrauwerte der fünf Komposite nach dem Polieren. Bei vergleichender Betrachtung der Gesamtmittelwerte jedes einzelnen Komposites nach Anwendung der 9 Bearbeitungsmethoden wiesen die Prüfkörperoberflächen von Premise die geringsten Rauigkeiten auf (Abb.12). Mit einem durchschnittlichen Mittenrauwert von 0,266 μm ergaben sich signifikante Unterschiede zu Herculite XRV, Ceram X Duo und Filtek Supreme ($p<0,001$) sowie Tetric Evo Ceram ($p=0,009$; Tab. 4). Die polierten Probenoberflächen von Tetric Evo Ceram waren signifikant glatter als die von Herculite XRV ($p=0,001$), Ceram X Duo ($p<0,001$) und Filtek Supreme ($p=0,018$). Die durchschnittlich gemessenen Rautiefen der Prüfkörperoberflächen von Filtek Supreme und dem Hybridkomposit Herculite XRV waren nach dem Polieren fast gleich ($R_a=0,37 \mu\text{m}$, $R_a=0,38 \mu\text{m}$). Die größten gemittelten R_a -Werte wurden auf den Oberflächen

der Ceram X Duo Proben gemessen ($R_a=0,4 \mu\text{m}$), aber die Unterschiede zu Filtek Supreme und Herculite XRV waren nur gering und hatten keine statistische Signifikanz.

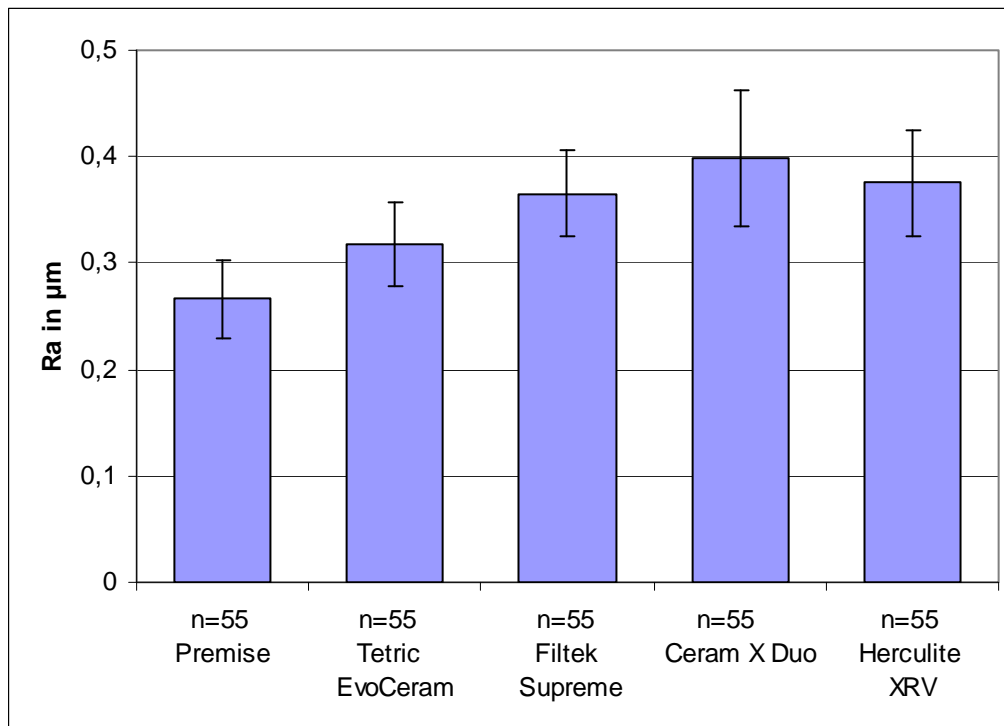


Abb. 12: Arithmetischer Mittenrauwert R_a der fünf verschiedenen Komposite jeweils gemittelt über die 10 Bearbeitungsmethoden; (MW mit 95% Konfidenzintervall).

Tabelle 4: Arithmetischer Mittenrauwert R_a der fünf verschiedenen Komposite nach Ausarbeitung und Politur; Gesamtmittelwert aller Bearbeitungsmethoden von $n=55$ Prüfkörpern pro Material; p-Werte (zweifaktorielle Anova und Post-Hoc-Test nach Scheffé)

| Komposit | R_a (Mittelwert/ 95% Konfidenzintervall) | Herculite XRV | Ceram X Duo | Filtek Supreme | Tetric EvoCeram |
|-----------------|--|------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Premise | 0.266 / 0.036 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.009 |
| Tetric EvoCeram | 0.317 / 0.04 | 0.001 | 0.000 | 0.018 | |
| Filtek Supreme | 0.365 / 0,041 | 0.962 | 0.236 | | |
| Ceram X Duo | 0.398 / 0.064 | 0.643 | | | |
| Herculite XRV | 0.376 / 0.05 | | | | |

4.1.2. Vergleichende Betrachtung der Komposite anhand des Profillängenverhältnisses (LR)

In Abbildung 13 wird deutlich, dass die Analyse der Kompositoberflächen anhand des Profillängenverhältnisses die gleiche Rangfolge aufweist, wie bereits anhand des arithmetischen Mittenrauwertes ermittelt wurde. Jedoch sind die Differenzen zwischen den Kompositen geringer ausgeprägt. Die Prüfkörper von Premise (LR= 1,091) wiesen die glattesten Oberflächen auf (Abb. 13). Die Unterschiede zu Tetric Evo Ceram (LR= 1,109) und Filtek Supreme (LR=1,112) waren jedoch gering und von keiner statistischen Signifikanz (Tab. 5). Die Probenoberflächen von Tetric Evo Ceram (LR=1,109) und Filtek Supreme (LR=1,112) zeigten ähnliche LR-Werte. Die rauesten Oberflächen bezüglich des Profillängenverhältnisses wurden bei Ceram X Duo (LR=1,166) und Herculite XRV (LR= 1,153) ermittelt. Die Unterschiede zu den drei erst genannten waren statisch signifikant ($p < 0,001$).

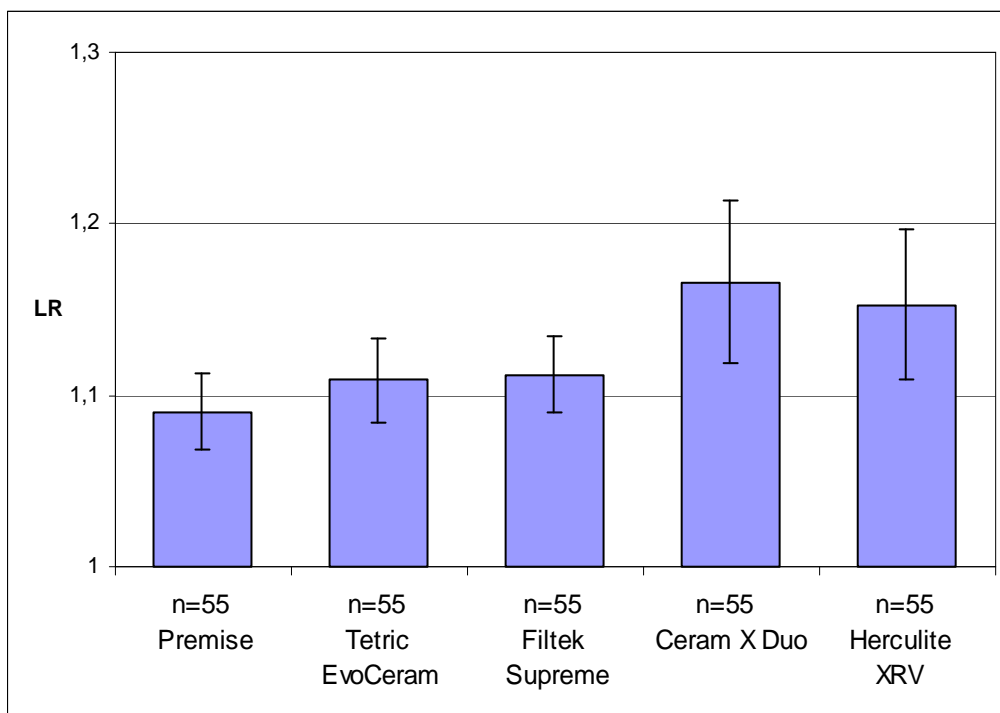


Abb. 13: Profillängenverhältnis der fünf verschiedenen Komposite jeweils gemittelt über die 10 Bearbeitungsmethoden; (MW mit 95% Konfidenzintervall).

Tabelle 5: Profillängenverhältnis (LR) der fünf verschiedenen Komposite nach Ausarbeitung und Politur; Gesamtmittelwert aller Bearbeitungsmethoden von n=55 Prüfkörpern pro Material; p-Werte (zweifaktorielle Anova und Post-Hoc-Test nach Scheffé)

| Komposit | LR (Mittelwert/ 95% Konfidenzintervall) | Herculite XRV | Ceram X Duo | Filtek Supreme | Tetric EvoCeram |
|-----------------|---|------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Premise | 1,091/ 0,022 | 0.000 | 0.000 | 0.130 | 0.274 |
| Tetric EvoCeram | 1,109/ 0,025 | 0.000 | 0.000 | 0.997 | |
| Filtek Supreme | 1,112/ 0,022 | 0.000 | 0.000 | | |
| Ceram X Duo | 1,166/ 0,048 | 0.616 | | | |
| Herculite XRV | 1,153/ 0,043 | | | | |

4.1.3 Einfluss der Poliersysteme auf die Kompositoberflächen unter Betrachtung des arithmetischen Mittenrauwerkes (R_a)

Mit Ausnahme der Methode 2, hinterließ die Referenzmethode Sof-Lex Disks (Methode 10) bei allen fünf Kompositen die größten Rautiefen (Abb. 14). Die Differenzen zu den übrigen Methoden waren statistisch signifikant ($p < 0,001$, Tab. 6). Zwischen den untersuchten Kompositen waren große Unterschiede in den gemessenen R_a -Werten zu verzeichnen. Während bei Premise, Tetric Evo Ceram und Filtek Supreme die Messergebnisse für den arithmetischen Mittenrauwerter zwischen $0,412 \mu\text{m}$ (Premise) und $0,51 \mu\text{m}$ (Tetric Evo Ceram) lagen, wurden bei Herculite XRV ($R_a = 0,658 \mu\text{m}$) und Ceram X Duo ($R_a = 0,761 \mu\text{m}$) deutlich höhere Werte registriert.

Die zweitgrößten Rauheitswerte erlangte bei allen untersuchten Kompositen die Anwendung der OptiShine Polierbürstchen. Das Referenzprodukt Herculite XRV ($R_a = 0,3 \mu\text{m}$) verzeichnete hier zusammen mit Premise ($R_a = 0,312 \mu\text{m}$) die geringsten Rauheitswerte. Die größten Mittenrauwerter wurden auf Filtek Supreme Oberflächen gemessen ($R_a = 0,412 \mu\text{m}$).

Die Bearbeitung der Prüfkörper mit Enhance/PoGo erzielte im Vergleich zu den anderen Poliersystemen die zweitbesten Politurergebnisse bei allen untersuchten Materialien. Die arithmetischen Mittenrauwerter lagen hier zwischen $0,24 \mu\text{m}$ (Premise) und $0,357 \mu\text{m}$ (Filtek Supreme). Bei den vier Nanokompositen bewirkte die Politur mit Enhance/PoGo deutlich geringere durchschnittliche gemessene R_a -Werte als die Anwendung von OptiShine. Das

Hybridkomposit Herculite XRV zeigte dagegen bei beiden Polierverfahren Enhance/PoGo und OptiShine fast gleiche Rauigkeitswerte ($R_a = 0,294 \mu\text{m}$ bzw. $R_a = 0,3 \mu\text{m}$).

Nach der Politur mit Astropol wurden bei allen fünf Kompositen die glattesten Oberflächen registriert. Das Nanohybridkomposit Premise wies die geringsten Mittenrauwerte auf ($R_a = 0,115 \mu\text{m}$). Bei den anderen Materialien erstreckten sich die R_a -Werte zwischen $0,187 \mu\text{m}$ (Tetric Evo Ceram) und $0,225 \mu\text{m}$ (Herculite XRV).

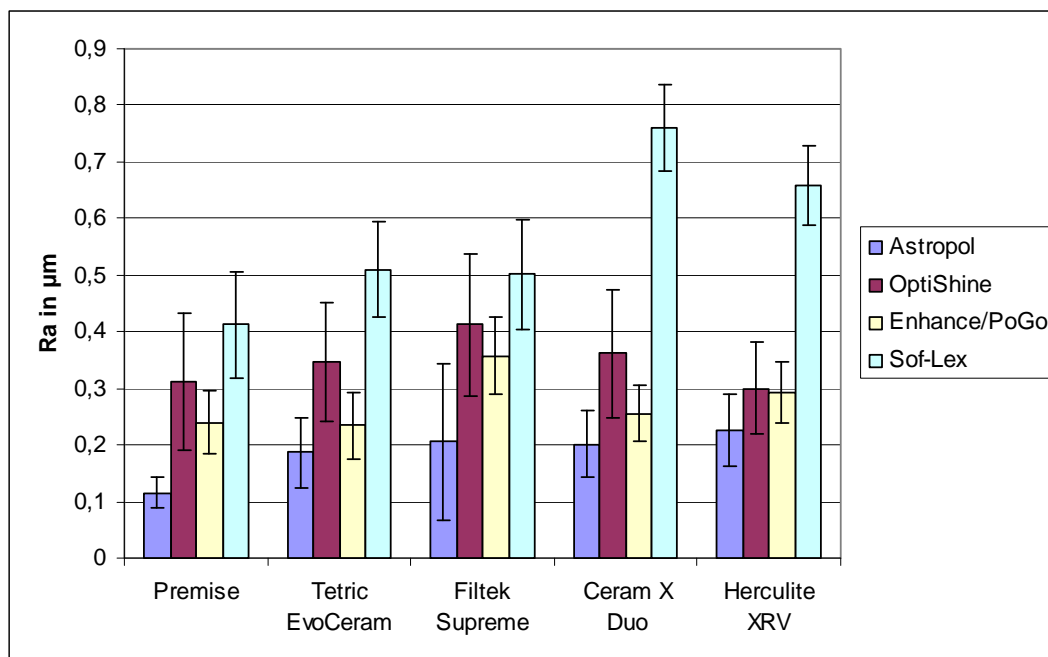


Abb. 14: Arithmetischer Mittenrauwert R_a ($MW \pm SA$) von Kompositoberflächen nach unterschiedlicher Politur (Astropol, OptiShine, Enhance/PoGo, Sof-Lex). Jeder Balken kennzeichnet den Mittelwert von $n=15$ Prüfkörper (Ausnahme OptiShine $n=10$ wegen Herausnahme der Methode 2).

4.1.4 Einfluss der Poliersysteme auf die Kompositoberflächen unter Betrachtung des Profillängenverhältnisses (LR)

Die stärkste Oberflächenvergrößerung bei allen fünf Kompositen bewirkten mit Ausnahme der Methode 2 die Sof-Lex Disks (Abb. 15). Sie erzielten mit Abstand die größten LR-Werte. Die Unterschiede zu den übrigen Methoden waren statistisch signifikant ($p < 0,001$; Tab. 7). Wie bereits bei Betrachtung der arithmetischen Mittenrauwerte hervorgehoben wurde, zeigten auch bezüglich des Profillängenverhältnisses Ceram X Duo und Herculite

XRV nach Politur mit Sof-Lex Disks deutlich höhere LR-Werte als die übrigen untersuchten Komposite. Während bei Premise, Tetric Evo Ceram und Filtek Supreme die Messergebnisse für das Profillängenverhältnis zwischen 1,208 (Premise) und 1,045 (Tetric Evo Ceram) lagen, wurden bei Herculite XRV (LR=1,411) und Ceram X Duo (LR=1,452) deutlich höhere Werte registriert. Diese Tatsache erklärt die hohen LR-Werte von Ceram X Duo und Herculite XRV bei der Betrachtung der Gesamtmittelwerte aller Poliervverfahren (siehe Abb. 13).

Die zweitgrößten Messergebnisse erlangten bei allen vier Nanokompositen die Politur mit OptiShine Bürstchen. Die LR-Werte erstreckten sich hier zwischen 1,073 (Premise) und 1,111 (Tetric Evo Ceram). Das Referenzprodukt Herculite XRV wies im Vergleich zu den Nanokompositen das geringste Profillängenverhältnis (LR=1,052) auf.

Nach Bearbeitung der Prüfkörper mit Enhance/PoGo lagen die Messergebnisse für das Profillängenverhältnis zwischen 1,048 (Tetric Evo Ceram) und 1,09 (Filtek Supreme).

Die geringsten Oberflächenrauigkeiten bezüglich des Profillängenverhältnisses erreichte das Poliersystem Astropol bei allen untersuchten Nanokompositen. Bei Tetric Evo Ceram und Ceram X Duo war jedoch nur ein geringer Unterschied zwischen den LR-Werten von Astropol und Enhance/PoGo auszumachen (Abb. 15). Das Mikrohybridkomposit Herculite XRV wies sogar die gleichen Profillängenverhältnisse zwischen Astropol und Enhance/PoGo (LR=1,052) auf. Des Weiteren wird in Abbildung 15 deutlich, dass Astropol eine ähnliche Polierwirkung auf die unterschiedlichen Kompositmaterialien hatte. Die Differenzen zwischen den Kompositen waren gering und erstreckten sich zwischen 1,022 (Premise) und 1,052 (Herculite XRV).

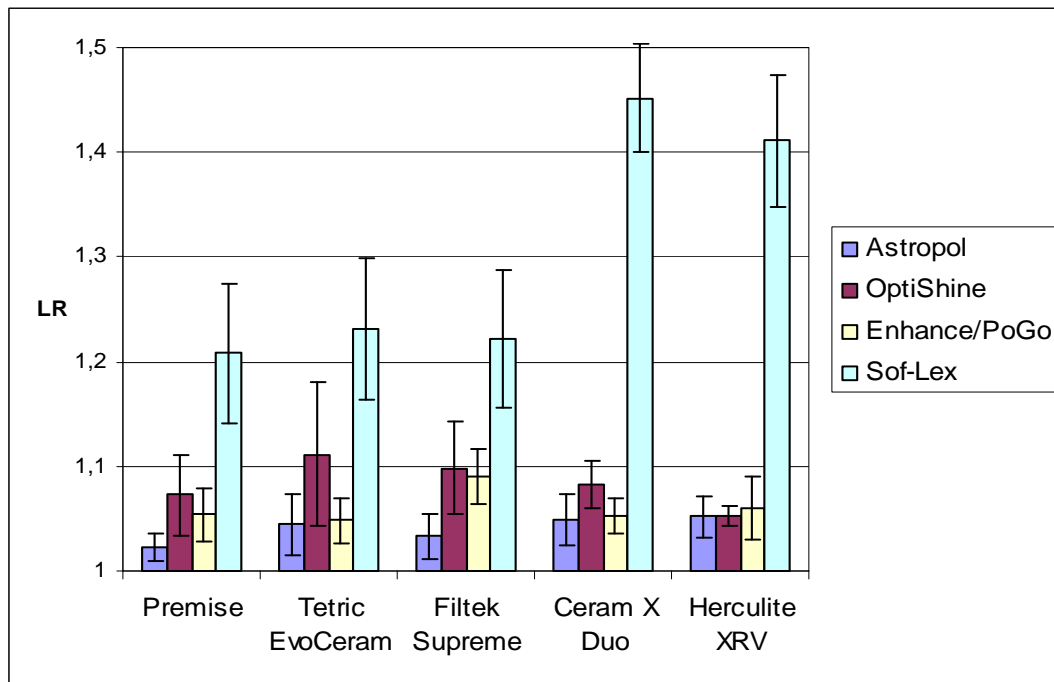


Abb. 15: Profillängenverhältnis LR (MW±SA) von Kompositoberflächen nach unterschiedlicher Politur (Astropol, OptiShine, Enhance/PoGo, Sof-Lex). Jeder Balken kennzeichnet den Mittelwert von n=15 Prüfkörper (Ausnahme OptiShine n=10 wegen Herausnahme der Methode 2).

4.1.5 Vergleichende Betrachtung der Bearbeitungsmethoden anhand des arithmetischen Mittenrauwerkes (R_a)

Abbildung 16 veranschaulicht die durchschnittlichen R_a -Werte der 10 Bearbeitungsmethoden nach Anwendung auf den fünf untersuchten Kompositen. Dabei wird der Einfluss der Ausarbeitsverfahren auf die Politurresultate deutlich. Bei allen drei Poliersystemen bewirkte die Vorbehandlung mit einem 30 μm Diamantfinierer (AV1) die größten R_a -Werte (siehe Methode 1, 2, 3; Abb. 16). Durch die zusätzliche Verwendung eines 20 μm Diamantfinierers (AV2) bzw. eines Hartmetallfinierers (AV3) konnte die Oberflächerauhigkeit sukzessiv verringert werden, so dass unabhängig vom Poliersystem mit dem Ausarbeitsverfahren 3 (DF30/HMF) und der anschließenden Politur die geringsten R_a -Werte erzielt wurden (siehe Methode 7, 8, 9; Abb. 16).

Die Differenzen zwischen den Bearbeitungsmethoden bezüglich des arithmetischen Mittenrauwerkes waren bei den drei Poliersystemen unterschiedlich ausgeprägt. So wurden die Politurergebnisse von Astropol und Enhance/PoGo nur sehr gering von den Ausarbeitsverfahren beeinflusst. Zwischen den Methoden 1 (DF30/Astropol), 4

(DF30/20/Astropol) und 7 (DF30/HMF/Astropol) bzw. zwischen den Methoden 3 (DF30/Enhance/PoGo), 6 (DF30/20/ Enhance/PoGo) und 9 (DF30/HMF/Enhance/PoGo) wurden nur geringe Differenzen ohne statistische Signifikanz festgestellt (Abbildung 16, Tabelle 6). Im Gegensatz dazu unterschieden sich bei OptiShine die Methoden 2 (DF30/Opti/Shine), 5 (DF30/20/ OptiShine) und 8 (DF30/HMF/OptiShine) statistisch hochsignifikant ($p < 0,001$; Tabelle 6).

Bei dem Polierverfahren Astropol, welches die geringsten arithmetischen Mittenrauwerte erzielte, zeigte die Vorbehandlung mit einem 30 μm Diamantfinierer und einem Hartmetallfinierer (Methode 7) das glatteste Resultat von allen Bearbeitungsmethoden und war somit signifikant glatter als die Methoden von Enhance/PoGo und OptiShine ($p < 0,05$) sowie der Referenzmethode Sof-Lex Disks ($p < 0,001$, Tabelle 6). Von OptiShine polierte Prüfkörper, die mit Ausarbeitsverfahren 1 oder 2 vorbehandelt wurden (Methode 2 und 5), waren signifikant rauer als von Astropol und Enhance/PoGo polierte Proben ($p < 0,001$; Tabelle 6). Die Referenzmethode Sof-Lex Disks wies gegenüber den anderen Bearbeitungsmethoden, mit Ausnahme der Methode 2, signifikant höhere R_a -Werte ($p < 0,001$, Tabelle 6) auf.

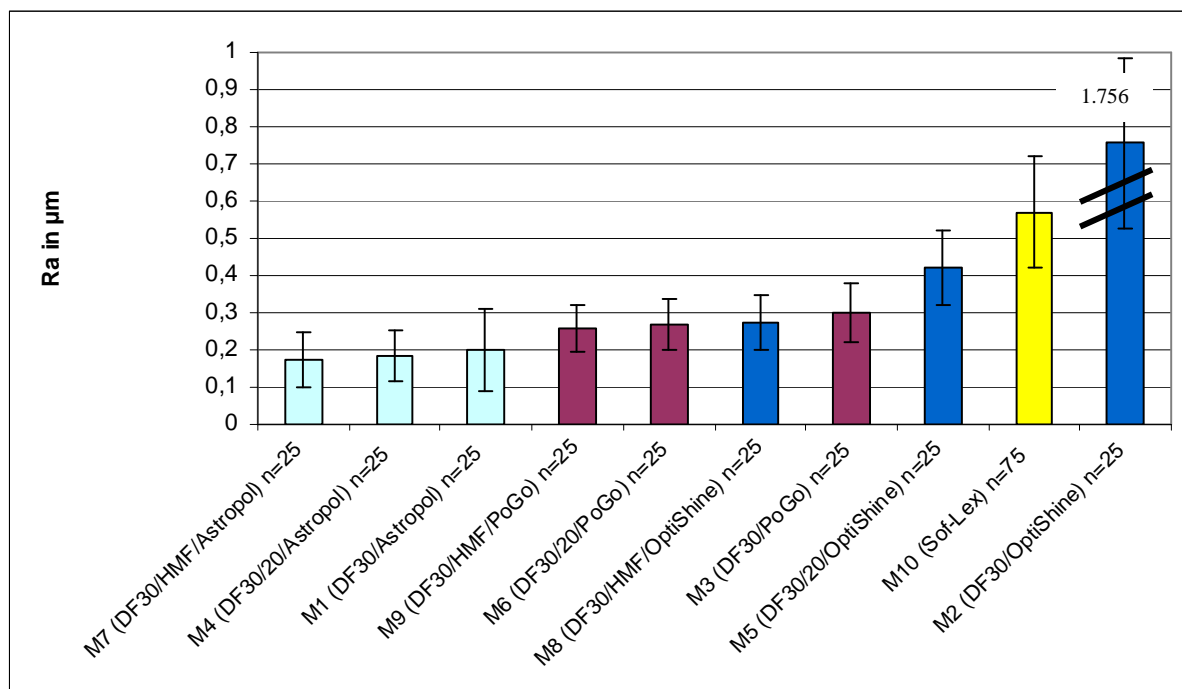


Abb. 16: Durchschnittliche arithmetische Mittenrauwert R_a ($MW \pm SA$) der 10 angewandten Bearbeitungsmethoden für alle fünf untersuchten Composite.

Tabelle 6: Arithmetische Mittenrauwert (R_a) von Kompositoberflächen nach Politur durch Bearbeitungsmethoden 1-10; Mittelwert von n=25 Prüfkörpern (Methode 1-9) und n=75 (Methode 10) ; p-Werte (zweifaktorielle Anova und Post-Hoc-Test nach Scheffé)

| Bearbeitungs- methode | R_a (Mittelwert/ Standardabweichung) | M 10 | M 5 | M 3 | M 8 | M 6 | M 9 | M 1 | M 4 |
|---|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M 7 (DF 30/HFM/ Astropol) | 0.174/0.074 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.007 | 0.037 | 0.990 | 1.000 |
| M 4 (DF 30/20/ Astropol) | 0.185/0.068 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.017 | 0.034 | 0.129 | 1.000 | |
| M 1 (DF 30/ Astropol) | 0.200/0.110 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.114 | 0.183 | 0.441 | | |
| M 9 (DF 30/HMF/ PoGo) | 0.258/0.065 | 0.000 | 0.000 | 0.811 | 1.000 | 1.000 | | | |
| M 6 (DF 30/20/ PoGo) | 0.270/0.068 | 0.000 | 0.000 | 0.966 | 1.000 | | | | |
| M 8 (DF 30/HMF/ OptiShine) | 0.274/0.073 | 0.000 | 0.000 | 0.988 | | | | | |
| M 3 (DF 30/ PoGo) | 0.301/0.079 | 0.000 | 0.000 | | | | | | |
| M 5 (DF 30/20 OptiShine) | 0.419/0.100 | 0.000 | | | | | | | |
| M 10 (Sof-Lex) | 0.569/0.150 | | | | | | | | |
| M 2 (DF 30/ OptiShine) | 1.756/0.229 | von prüfstatistischer Analyse ausgeschlossen | | | | | | | |

4.1.6 Vergleichende Betrachtung der Bearbeitungsmethoden anhand des Profillängenverhältnisses (LR)

Bei dem dreistufigen Poliervorgang Astropol zeigte die Art der Vorbehandlung keinen signifikanten Einfluss auf das Profillängenverhältnis. Methode 1 (DF30/Astropol; LR=1,038), 4 (DF30/20/Astropol; LR=1,042) und 7 (DF30/HMF/Astropol; LR=1,042) wiesen ähnliche LR-Werte auf. Das gleiche gilt für das Poliersystem Enhance/PoGo. Die ermittelten Profillängenverhältnisse der Methoden 3 (DF30/Enhance/PoGo; LR=1,069), 6 (DF30/20/Enhance/PoGo; LR=1,056) und 9 (DF30/HMF/Enhance/PoGo; LR=1,057) zeigten kaum Differenzen. Im Gegensatz dazu nahm die Art der Vorbehandlung einen großen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit bei Einsatz der OptiShine Bürstchen. Während nach Anwendung der Methode 2 (DF30/OptiShine) ein Profillängenverhältnis von 1,312 erzielt wurde, konnte durch zusätzliche Anwendung eines 20 µm Diamantfinierers (Methode 5;

LR=1,098) die Oberflächenrauigkeit signifikant reduziert werden. Nach Bearbeitung der Kompositoberflächen mit Methode 8 (DF30/HMF/OptiShine) wurde eine weitere Glättung erreicht (LR=1,068), deren Differenz zu Methode 5 sich nicht mehr statistisch signifikant unterschied.

Die Methode 2 (DF30/OptiShine) zeigte bezüglich des Profillängenverhältnisses keinen signifikanten Unterschied zu den Sof-Lex Disks (Methode 10). Abbildung 17 veranschaulicht, dass nach Anwendung von Methode 2 (LR=1,312) und Methode 10 (LR=1,305) die größten LR-Werte gemessen wurden. Die Unterschiede zu den übrigen Bearbeitungsmethoden waren statistisch hochsignifikant ($p < 0,001$; Tab. 7). Astropol wies bezüglich des Profillängenverhältnisses nur noch gegenüber Methode 2 (DF30/OptiShine; $p < 0,001$) und 5 (DF30/20/OptiShine; $p < 0,05$) signifikant geringere LR-Werte auf (Tab. 7).

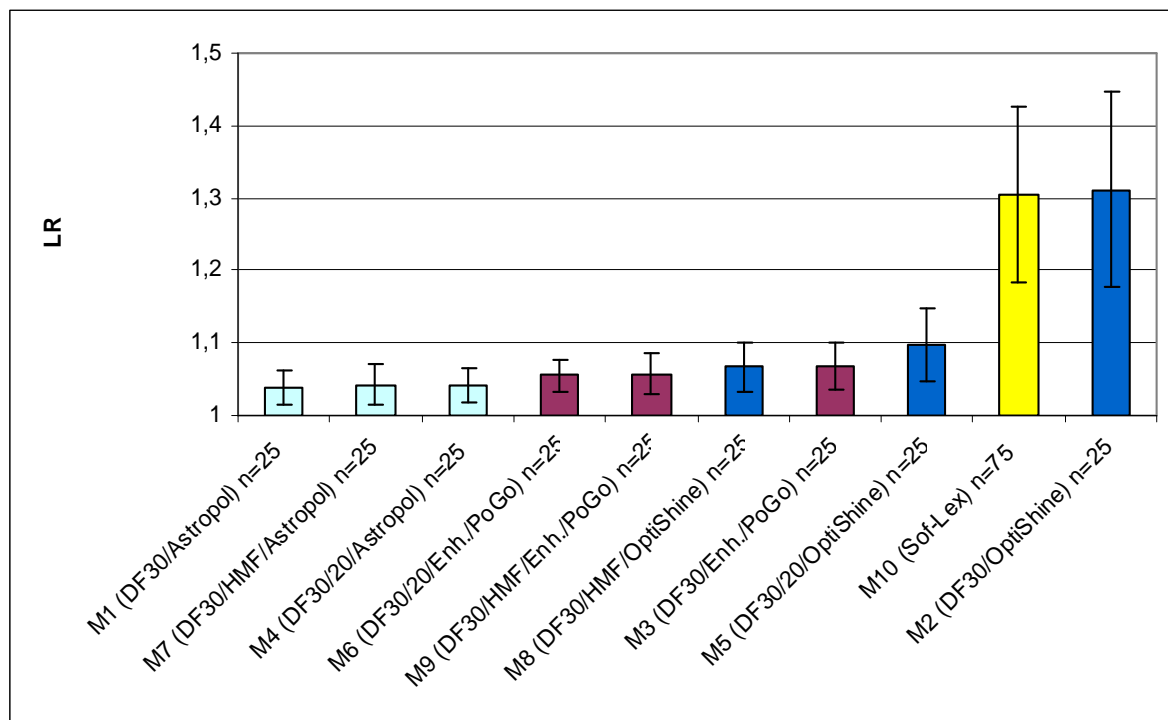


Abb. 17: Durchschnittliches Profillängenverhältnis LR (MW±SA) der 10 angewandten Bearbeitungsmethoden für alle fünf untersuchten Composite.

Tabelle 7: Profillängenverhältnis (LR) von Kompositoberflächen nach Politur durch Bearbeitungsmethoden 1-10; Mittelwert von n=25 Prüfkörpern (Methode 1-9) und n=75 (Methode 10) ; p-Werte (zweifaktorielle Anova und Post-Hoc-Test nach Scheffé)

[illegible]

4.2 Qualitative Beurteilung

4.2.1 Deskriptive Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen

Im folgenden Abschnitt sollen Oberflächencharakteristiken der unterschiedlichen Komposite nach der Politur beschrieben und anhand von REM-Bildern exemplarisch dargestellt werden.

Die Prüfkörperoberflächen der Nanohybridkomposite Premise und Tetric Evo Ceram zeigten unregelmäßig verteilte, kleine helle Areale, welche auf Präpolymerpartikel zurückzuführen sein könnten (Abb. 18 a, b, 19 b, 21 a). Nur sehr vereinzelt, insbesondere auf den Oberflächen der Herculite- und Tetric Evo Ceram-Prüfkörper, traten Unregelmäßigkeiten auf, die als kleine, dunkle runde Bereiche sichtbar waren und von Porositäten herrühren könnten (Abb. 18 b, e, 19 e, 21 b, e). Destruktive Veränderungen der Kompositoberflächen wurden nur selten beobachtet (Abb. 18 c, 20 a, e).

4.2.1.1 Kompositoberflächen im REM nach Politur mit Astropol

Übereinstimmend mit der quantitativen Auswertung erzielten auch in der qualitativen Analyse die Astropol-Polierer deutlich glattere Kompositoberflächen als die anderen Polierverfahren. Mit Ausnahme von Filtek Supreme konnten bei allen Kompositen einschließlich des Referenzproduktes Herculite XRV sämtliche Riefen der Diamant- und Hartmetallfinierer aus der jeweiligen Vorbehandlung beseitigt werden, wodurch überwiegend glatte und homogene Oberflächenstrukturen entstanden (Abb. 18 a, b, d, e). Der Astropol-Polierer selbst hinterließ vereinzelte Polierriefen, die im Vergleich zu den anderen Poliersystemen jedoch nur sehr schwach ausgeprägt waren (Abb. 18 d, e). Einen sehr glatten Eindruck vermittelten dabei die Prüfkörper von Tetric Evo Ceram (Abb. 18 b).

Die Prüfkörperoberflächen von Filtek Supreme zeigten im Gegensatz zu den anderen untersuchten Kompositen nach der Bearbeitung durch Methode 1 (DF30/Astropol) noch deutliche Spuren des 30 µm Diamantfinierers. Auf der Probenoberfläche wurden mehrere parallel verlaufende tiefe Riefen mit geringen Anteilen an Destruktionsspuren beobachtet (Abb. 18 c). Nach zusätzlicher Anwendung eines 20 µm Diamantfinierers (Methode 4) bzw.

eines Hartmetallfinierers (Methode 7) konnten die Astropol-Polierer die Finierspuren auf den Oberflächen beseitigen.

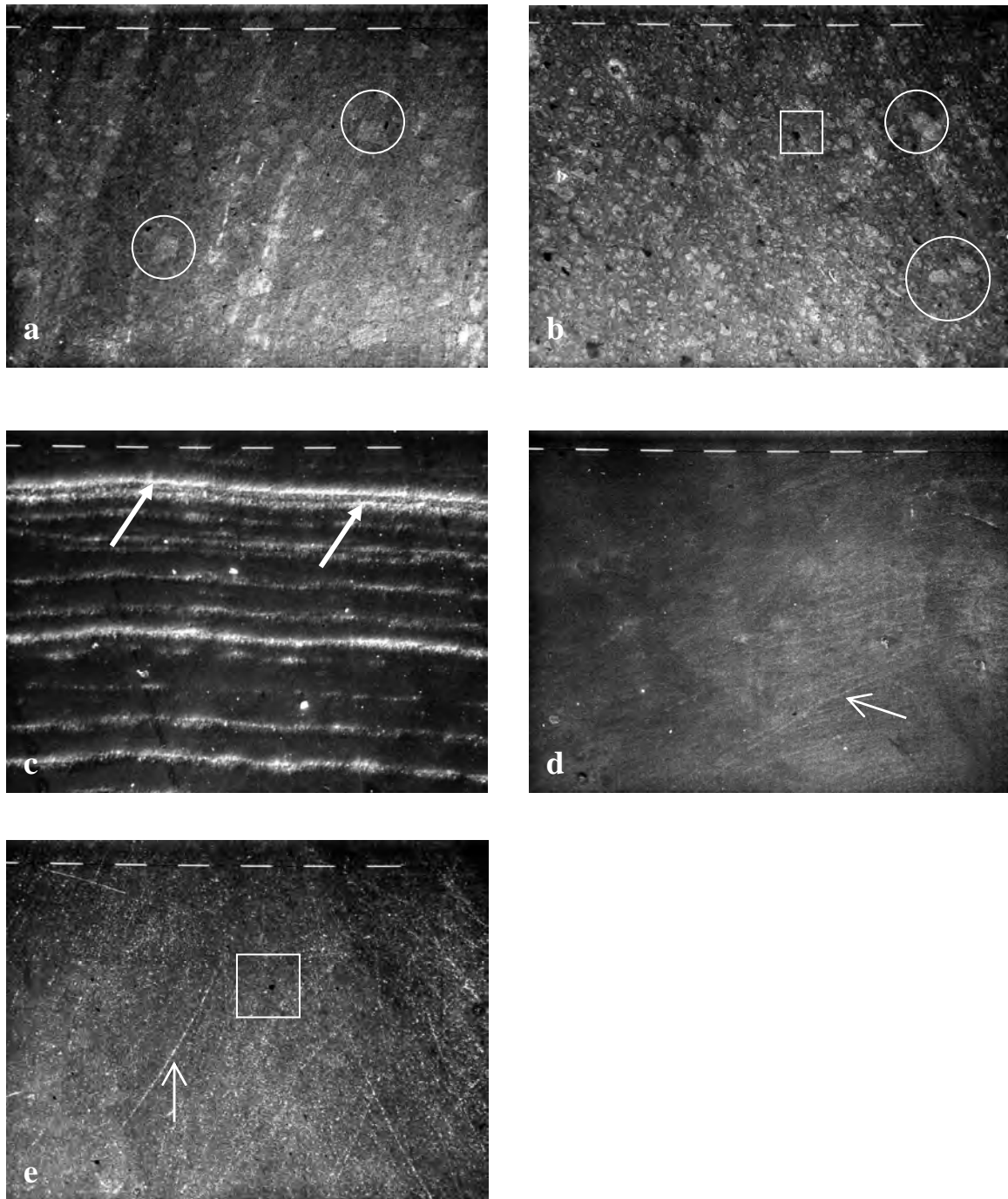


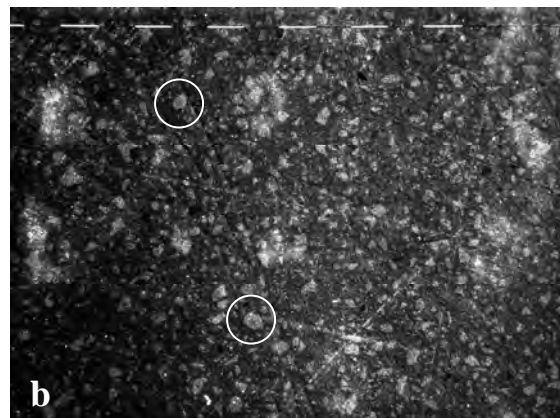
Abb. 18: REM-Aufnahmen von polierten Kompositoberflächen. Die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 100 µm. Dünne Pfeile kennzeichnen Polierriefen. Dicke Pfeile zeigen mögliche Destruktionen. Kreise weisen auf Präpolymerpartikel hin. Vierecke kennzeichnen mögliche Porositäten.

- a) Premise - Methode 7 (DF30/HMF/Astropol)
- b) Tetric Evo Ceram - Methode 1 (DF 30/Astropol)
- c) Filtek Supreme - Methode 1 (DF30/Astropol)
- d) Ceram X Duo - Methode 4 (DF 30/20/Astropol)
- e) Herculite XRV - Methode 7 (DF30/HMF/Astropol)

4.2.1.2 Kompositoberflächen im REM nach Politur mit Enhance/PoGo

Enhance/PoGo konnte die Riefen der jeweiligen Vorbehandlung durch die Diamant- und Hartmetallfinierer auf allen Kompositoberflächen beseitigen. Im Gegensatz zu dem Astropolssystem erschienen jedoch auf allen Probenoberflächen, mit Ausnahme von Tetric Evo Ceram deutlich mehr Polierspuren, welche bogenförmig und unregelmäßig verliefen. Im Vergleich zu OptiShine und Sof-Lex Disks hinterließ Enhance/PoGo weniger Spuren durch die Politur und wies größere glatte, homogene Bereiche auf. Die Tiefe der vorhandenen Polierriefen war nach Anwendung von Enhance/PoGo jedoch deutlich ausgeprägter als nach Politur mit OptiShine und Sof-Lex Disks (Abb. 19 a, c-e).

Ein Vergleich der fünf Kompositmaterialien im REM zeigte, dass Tetric Evo Ceram nach Bearbeitung mit Enhance/PoGo die besten polierten Oberflächen aufwies. Diese waren zum überwiegenden Teil homogen und glatt mit nur wenigen leichten Polierspuren (Abb. 19 b). Etwas mehr und tiefere Polierriefen als bei Tetric Evo Ceram wurden bei Ceram X Duo deutlich. Dennoch kamen hier immer noch größere glatte und homogene Areale zum Vorschein (Abb. 19 d). Die Prüfkörper von Premise, Herculite XRV und Filtek Supreme zeigten die am wenigsten geglätteten Oberflächen. Die Oberflächen wurden von zahlreichen und zum Teil tiefen Polierriefen dominiert (Abb. 19 a, c, e).



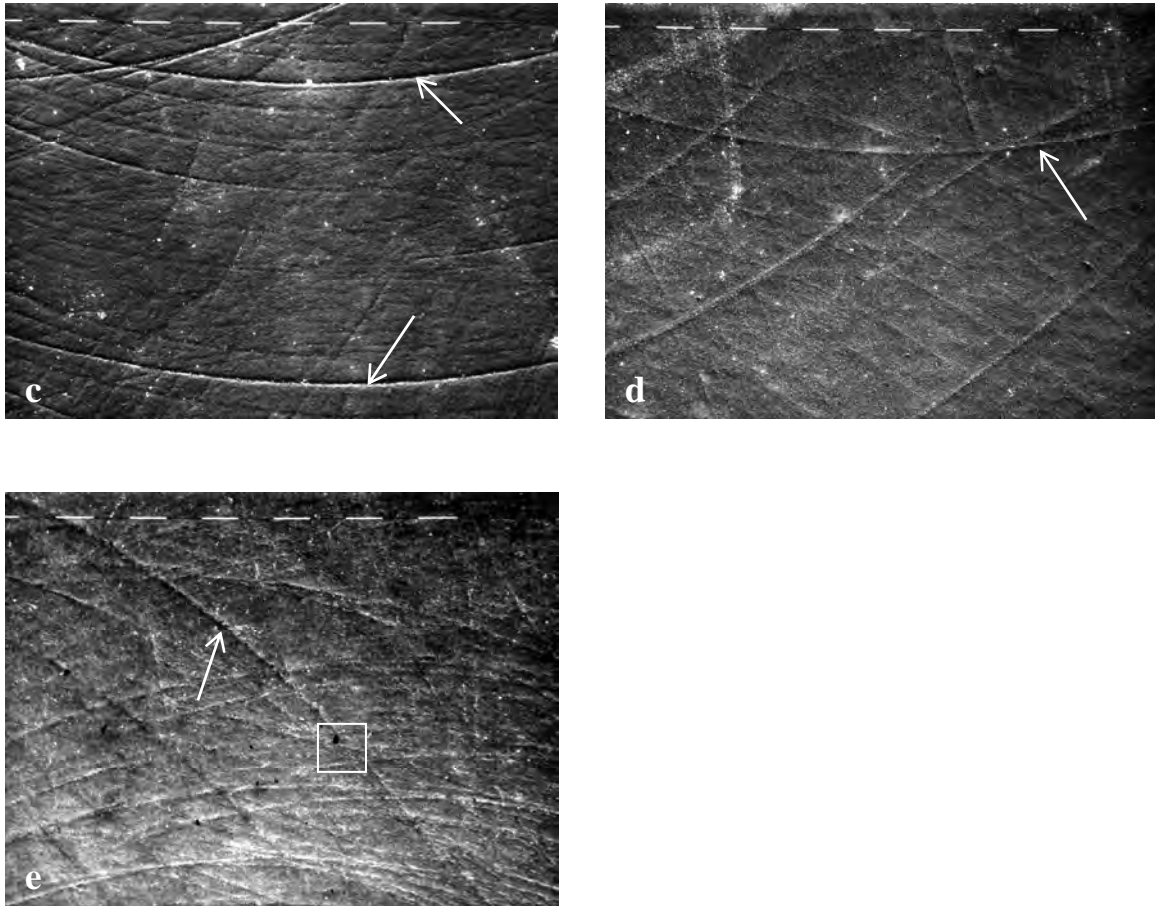


Abb. 19 a-e: REM-Aufnahmen von polierten Kompositoberflächen. Die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 100 μm . Pfeile weisen auf tiefere Spuren der Enhance-Polierer hin. Kreise weisen auf Präpolymerpartikel hin. Vierecke kennzeichnen mögliche Porositäten.

- a) Premise - Methode 3 (DF30/Enhance/PoGo)
- b) Tetric Evo Ceram – Methode 9 (DF30/HMF/Enhance/PoGo)
- c) Filtek Supreme - Methode 6 (DF 30/20/Enhance/PoGo)
- d) Ceram X Duo – Methode 3 (DF 30/Enhance/PoGo)
- e) Herculite XRV - Methode 6 (DF 30/20/Enhance/PoGo)

4.2.1.3 Kompositoberflächen im REM nach Politur mit OptiShine

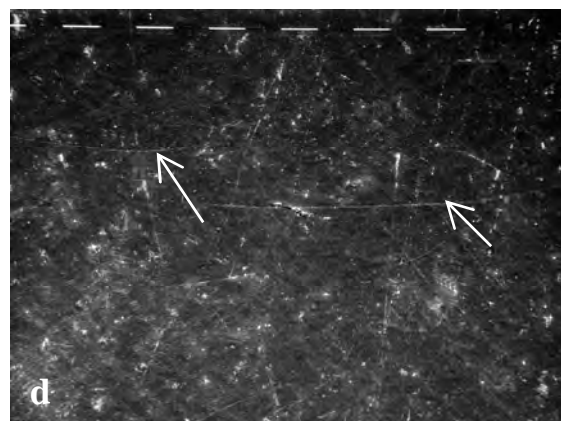
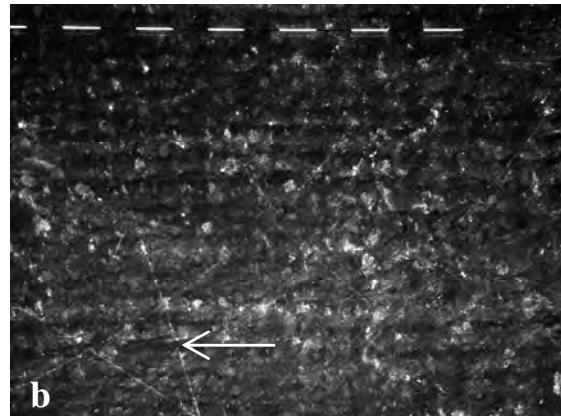
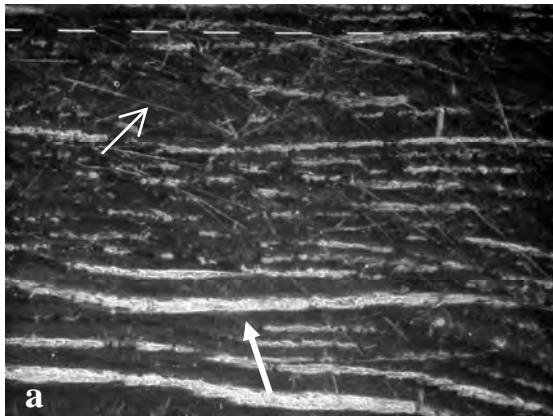
Die Abbildungen 20 a-e zeigen die Kompositprüfkörper nach Politur mit OptiShine. Im Vergleich zu den anderen Poliersystemen zeigen sich hier die rauesten Oberflächen. Die Abtragleistung war bei allen fünf Kompositen sehr gering und der Poliereffekt ungenügend.

Betrachtet man die Oberflächen nach Vorbehandlung mit einem 30 μm Diamantfinierer (Methode 2), so fällt bei allen fünf Kompositmaterialien eine noch stark ausgeprägte, parallel verlaufende Riefenbildung auf der gesamten Prüfkörperoberfläche auf. Zum Teil scheinen

die Profilunregelmäßigkeiten tiefer als die Korngröße des Diamantfinierers, was für Destruktionen spricht (Abb. 20 a, e).

Durch die zusätzliche Anwendung des 20 μm Diamantfinierers (Methode 5) blieben die Schleifspuren zwar bei allen Kompositoberflächen noch erhalten, aber es wurde eine deutliche Glättung der Prüfkörperoberfläche erzielt (Abb. 20 c).

Nach Vorbehandlung mit einem 30 μm Diamant- und einem Hartmetallfinierer (Methode 8) wiesen die verschiedenen Kompositprüfkörper unterschiedliche Erscheinungsbilder auf. Auf den Probenoberflächen von Ceram X Duo (Abb. 20 d), Premise und dem Referenzprodukt Herculite XRV konnten die Spuren der Vorbehandlung beseitigt werden, jedoch wurden sehr viele Polierriefen durch die Bürstchen sichtbar. Auf den Kompositoberflächen von Tetric Evo Ceram (Abb. 20 b) und Filtek Supreme wurden zum Teil sehr raue Areale mit deutlichen Diamantfinierspuren beobachtet, zusätzlich waren Polierriefen erkennbar.



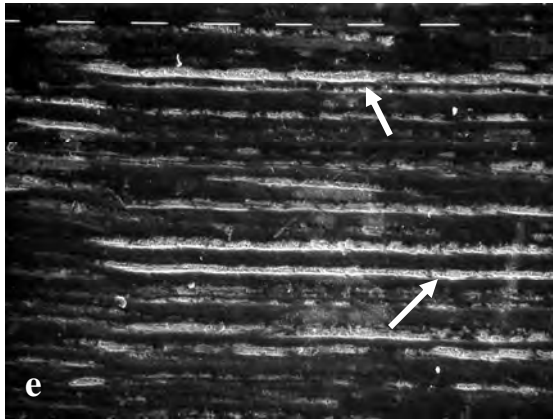


Abb.20 a-e: REM-Aufnahmen von polierten Kompositoberflächen. Die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 100 µm. Dicke Pfeile zeigen mögliche Destruktionen. Dünne Pfeile weisen auf Spuren des OptiShine Bürstchens.

- a) Premise - Methode 2 (DF 30/OptiShine)
- b) Tetric Evo Ceram - Methode 8 (DF 30/HMF/OptiShine)
- c) Filtek Supreme - Methode 5 (DF30/20/OptiShine)
- d) Ceram X Duo - Methode 8 (DF 30/HMF/OptiShine)
- e) Herculite XRV - Methode 2 (DF 30/OptiShine)

4.2.1.4 Kompositoberflächen im REM nach Politur mit Sof-Lex Disks

Die mit der Referenzmethode Sof-Lex Disks bearbeiteten Probenoberflächen wiesen bei allen fünf Kompositen eine ausgeprägte Riefenbildung auf der gesamten Prüfkörperoberfläche auf (Abb. 21 a-e). Die Riefen waren nicht so tief wie nach der Politur mit Enhance/PoGo, jedoch war die Anzahl von unregelmäßig verlaufenen Polierspuren weitaus höher. So zeigten alle Kompositoberflächen kaum homogene glatte Areale. Trotz schrittweiser Ausarbeitung von grob nach fein war es den feineren Scheiben offenbar nicht möglich, die Spuren der gröberen Disks einzuebnen.

Die Prüfkörperoberflächen von Filtek Supreme wiesen nach Einsatz von Sof-Lex Disks das raueste Erscheinungsbild auf. Es waren keine homogen glatten Bereiche auf der Oberfläche sichtbar (Abb. 21 c). Einen glatteren Eindruck vermitteln die Prüfkörper von Ceram X Duo und Herculite XRV. Neben Bereichen mit leichten Schleifspuren konnten kleinere Areale mit glatten, homogenen Anteilen beobachtet werden (Abb. 22d, e).

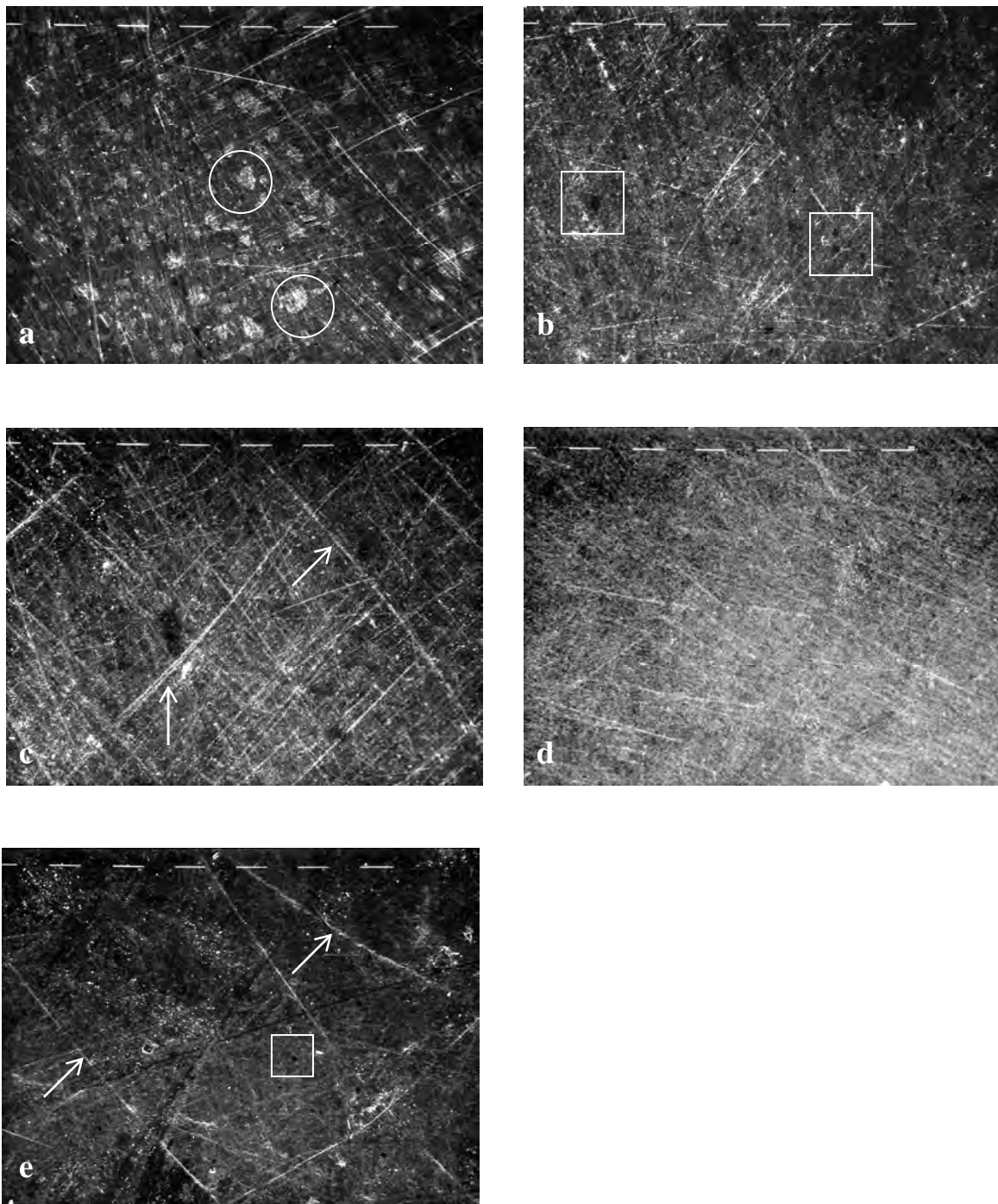


Abb.21 a-e: REM-Aufnahmen der Oberflächen der Komposite Premise (a), Tetric Evo Ceram (b), Filtek Supreme (c), Ceram X Duo (d) und Herculite XRV (e) nach Politur mit Sof-Lex Disks (Methode 10). Die Länge eines horizontalen Balkens entspricht 100 μm . Die Pfeile kennzeichnen die Spuren der initialen groben Disks. Kreise weisen auf Präpolymerpartikel hin. Vierecke kennzeichnen mögliche Porositäten.

4.2.2 Semi-quantitative Auswertung der REM-Aufnahmen

Mit Hilfe eines aufgelegten Rasters erfolgte eine Quantifizierung der REM-Auswertung. Abbildung 23 stellt die prozentuale Verteilung der Oberflächenmerkmale 1 – 4 für die verschiedenen Komposite dar.

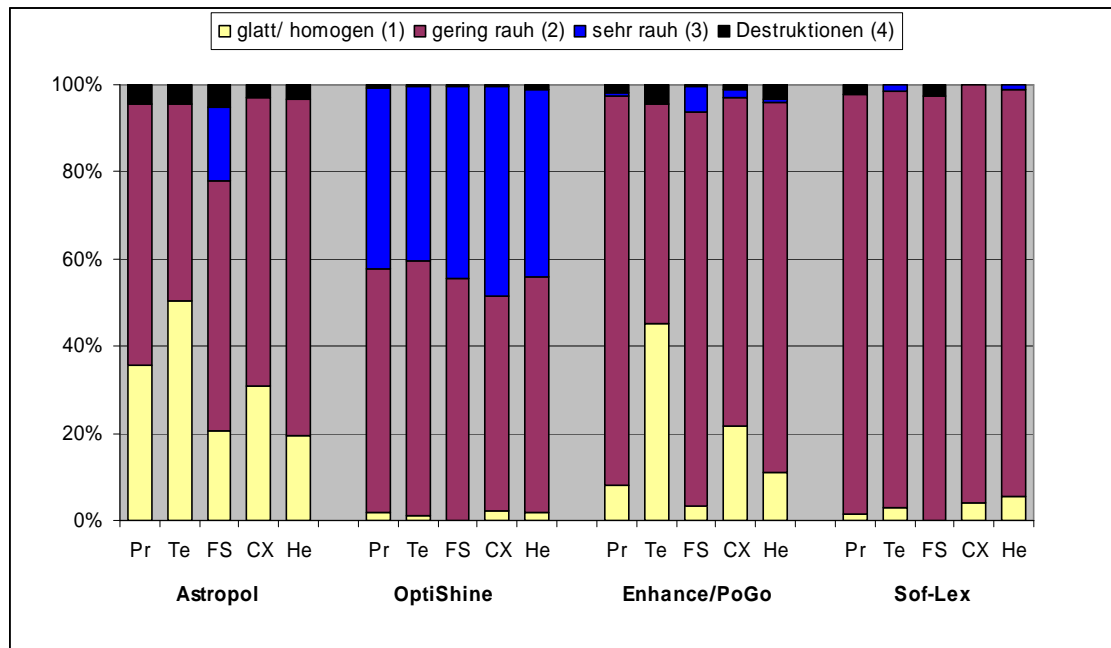


Abb. 23 : Prozentuale Verteilung der Merkmale 1 bis 4 auf Kompositoberflächen nach Politur mit Astropol, OptiShine, Enhance/PoGo und Sof-Lex; Pr: Premise; Te: Tetric Evo Ceram; FS: Filtek Supreme; CX: Ceram X Duo; He: Herculite XRV

Von den untersuchten Polierverfahren erzielte Astropol den höchsten Anteil glatter Merkmalsausprägung. Nach der Politur mit Astropol waren bei allen fünf Kompositoberflächen glatte, homogene Bereiche (Merkmal 1) feststellbar. Tetric Evo Ceram zeigte mit 48,3 % den größten und Herculite XRV mit 18,8 % den geringsten Anteil homogener Oberflächenareale. Geringe Rauigkeiten (Merkmal 2) waren zum überwiegenden Teil bei allen Kompositen feststellbar, wobei allerdings mit bis zu 16,5 % bei Filtek Supreme auch sehr raue Anteile (Merkmal 3) nachweisbar waren. Des Weiteren konnten bei allen Werkstoffen in geringem Umfang Destruktionsspuren (Merkmal 4) festgestellt werden.

Das Enhance/PoGo Poliersystem lieferte das zweitbeste Polierresultat. Auf allen Kompositoberflächen konnten glatte und homogene Areale (Merkmal 1) registriert werden. Die Oberflächen der Prüfkörper von Tetric Evo Ceram wiesen mit 43,3 % den größten Anteil des Merkmales 1 auf. Auf den anderen Kompositoberflächen erstreckte sich die Ausprägung

der glatten, homogenen Areale zwischen 20,8 % (Ceram X Duo) und 3,3 % (Filtek Supreme). Hier wurde die Oberfläche durch gering raue Areale (Merkmal 2) mit über 72,5 % dominiert. Filtek Supreme zeigte mit 5,5 % sehr rauer Anteile und dem geringsten Anteil an homogener Fläche (3,3 %) die am schlechtesten geglättete Oberfläche.

Die Politur mit OptiShine zeigte den geringsten Glättungseffekt. Bei allen fünf Kompositen wurde eine ähnliche prozentuale Verteilung der Rauigkeitsmerkmale ermittelt. Geringe Rauigkeiten (Merkmal 2) lagen zwischen 47,2 % (Ceram X Duo) und 56,3 % (Tetric Evo Ceram). Beim Komposit Ceram X Duo wurde mit 46,2 % der größte und bei Tetric Evo Ceram mit 38,3 % der kleinste Anteil sehr rauer Areale (Merkmal 3) ermittelt. Mit Ausnahme von Filtek Supreme wiesen die übrigen Kompositoberflächen glatte, homogene Areale (Merkmal 1) durchschnittlich mit 1,6 % auf.

Überwiegend geringe Profilunregelmäßigkeiten (Merkmal 2) erzielte bei allen Kompositoberflächen die Politur mit Sof-Lex Scheiben. Die Werte dafür lagen zwischen 89,8 % (Herculite XRV) und 93,5 % (Filtek Supreme). Mit Ausnahme von Filtek Supreme wiesen die anderen Kompositoberflächen geringe glatte und homogene Anteile auf, wobei Herculite XRV den größten Anteil mit 5,3 % erzielte.

5 **Diskussion**

5.1 **Diskussion der Methodik**

5.1.1 Studiendesign

In der vorliegenden in vitro Studie wurde die Polierbarkeit von Kompositen mittels verschiedener Polierverfahren untersucht. Die rotierende Bearbeitung erfolgte an planen Kompositprüfkörpern. Dieser Versuchsaufbau wird in den meisten Rauigkeitsstudien angewandt. So werden Vergleiche zwischen den vorliegenden Ergebnissen mit denen anderer Arbeiten prinzipiell ermöglicht. Des Weiteren erlauben in vitro Studien durch die Schaffung einer standardisierten Oberfläche die Möglichkeit eines Screenings für neue Polierverfahren. Der Aussagewert von in vitro Untersuchungen ist jedoch stets begrenzt, da die klinischen Bedingungen nur simuliert werden. Für die Auswertung der Oberflächenqualität muss in Betracht gezogen werden, dass die Bearbeitung der Kompositoberfläche außerhalb der Mundhöhle durchgeführt wird, was weniger Komplikationen in sich birgt. Somit lassen sich die Resultate dieser unter idealen Bedingungen durchgeführten Untersuchungen nur bedingt auf die klinische Praxis übertragen. Weitere Studien müssen die Materialien und Bearbeitungsmethoden unter klinischen Bedingungen bewerten. In der Literatur sind einige wenige Untersuchungen zu finden, die unter praxisähnlichen Bedingungen an extrahierten Zähnen erfolgten, wie z. B. bei Berastegui et al. (1992), Mitchel et al. (2002) oder Yalcin et al. (2006). Noch seltener wurden reine in vivo Studien [Jung et al., 2004/05] durchgeführt. Die hierfür benötigte Replika-Technik stellt einen hohen methodischen Aufwand dar.

5.1.2 Untersuchte Materialien

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Polierbarkeit von neu entwickelten Nanokompositen zu bewerten und mit einem herkömmlichen Mikrohybridkomposit zu vergleichen. Das als Referenzprodukt verwendete Komposit Herculite XRV hat sich mit seiner guten Polierbarkeit seit vielen Jahren in der klinischen Praxis bewährt. Dies wurde in zahlreichen Studien bestätigt [Chung 1994, Jung et al. 2003, Kaplan et al. 1996]. Um aussagekräftige Schlüsse über die Gruppe der Nanokomposite ziehen zu können, wurden vier verschiedene Produkte ausgewählt, die sich hinsichtlich Matrix- und Füllerzusammensetzung

unterscheiden. Tetric Evo Ceram, Premise und Ceram X Duo gelten als Nanohybridkomposite, Filtek Supreme ist ein Nanofüllerkomposit.

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, lagen die Kompositmaterialien in unterschiedlichen Applikationssystemen vor. Ceram X Duo wurde als einziges der verwendeten Komposite in Minikarpulen statt in Applikationsdrehspritzen geliefert. Zur Herstellung der Kompositprüfkörper wurden bei Ceram X Duo mehrere Portionen benötigt, um die jeweilige Hohlform auszufüllen. Hingegen konnte bei den anderen Kompositen die Hohlform mit dem Inhalt einer einzelnen Applikationsspritze gefüllt werden. Eine Voruntersuchung aller Prüfkörper unter dem Stereomikroskop diente zum Ausschließen von fehlerhaften Proben. Prüfkörper mit Unregelmäßigkeiten und Porositäten auf der Oberfläche wurden direkt verworfen. Dabei zeigten die Ceram X Duo-Proben im Vergleich zu den anderen Kompositprüfkörpern vermehrt Unregelmäßigkeiten auf den Probenoberflächen. Die Ceram X Duo-Prüfkörper erschienen zum Teil inhomogen und wiesen Porositäten auf. Die Ursache dafür ist unklar. Ein herstellungsbedingtes Auftreten von Porositäten durch Einbringen mehrerer Karpulen in die Hohlform konnte ausgeschlossen werden, da auch nach der Verwendung des Inhaltes einer einzigen Karpule im Stereomikroskop Hinweise auf Porositäten beobachtet wurden. Es ist davon auszugehen, dass die Lufteinschlüsse entweder bereits im Material vorlagen oder durch das Auspressen aus der relativ kleinen Ausführungsöffnung der Karpule zustande gekommen sind. Bei der späteren Evaluierung der REM-Aufnahmen der bearbeiteten Prüfkörper waren bei allen fünf Kompositmaterialien vereinzelt Unregelmäßigkeiten in Form von Porositäten sichtbar. Der mit der Ausarbeitung und Politur verbundene Materialabtrag kann zum Freilegen von dicht unterhalb der Oberfläche lokalisierten Porositäten führen. Im Gegensatz zur stereomikroskopischen Voruntersuchung wurde auf den REM-Aufnahmen der Ceram X Duo-Prüfkörper keine höhere Anzahl an Porositäten im Vergleich zu den anderen Kompositmaterialien beobachtet.

5.1.3 Angewandte Ausarbeitsverfahren und Poliersysteme

In der Praxis erfolgt vor der Politur die Ausarbeitung der Füllungs Oberfläche. Um eine geeignete und effektive Vorbehandlung für das jeweilige Poliersystem zu ermitteln, wurde jedes der Polierverfahren mit drei verschiedenen Ausarbeitsverfahren kombiniert.

In der vorliegenden Studie wurden drei verschiedenartige Poliermethoden ausgewählt, die häufig in der zahnärztlichen Praxis angewendet werden (Gummi- und Silikonpolierer, abrasive Bürstchen). Die drei Poliersysteme unterscheiden sich in der Anzahl der Polierschritte. Die OptiShine-Bürstchen gelten als einstufiges, Enhance/PoGo als zweistufiges und Astropol als dreistufiges Poliersystem. Ziel war es, die Effektivität von one-step und multi-step Systemen zu bewerten und miteinander zu vergleichen.

Um eine Zeit- und Kostenersparnis zu erlangen, wurden diverse einstufige Poliersysteme entwickelt. Darunter fällt auch das OptiShine System, dessen Polierwirkung durch die Siliziumkarbidpartikel in den Borstenfilamenten zustande kommt.

Bei dem Zweischrittsystem Enhance/PoGo handelt es sich um Silikonpolierer, deren Abrasivpartikel aus Siliziumdioxid, Aluminiumdioxid (Enhance) und Diamantstaub (PoGo) bestehen. Auf dem Dentalmarkt wird PoGo als Einschnitt-Diamant-Mikropolierer deklariert. Jedoch empfiehlt der Hersteller vor Gebrauch des PoGo-Polier-Systems eine Glättung der Oberfläche durch Enhance-Finisher. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie Enhance/PoGo als zweistufiges Poliersystem klassifiziert. Zur Erzielung einer größtmöglichen Effektivität, wurde, wie vom Hersteller empfohlen, mit PoGo zuerst 15 Sekunden mit höherem Druck dann 15 Sekunden mit geringerem Anpressdruck poliert.

In einigen Studien wurde PoGo als einstufiges Verfahren angewendet [Paravina et al., 2004; Turssi et al., 2004; Türkün, 2005; St. Georges et al., 2005].

Das Astropol Poliervorgehen steht in dieser Studie als Vertreter der klassischen multi-step Poliersysteme. Es enthält Abrasivpartikel aus Aluminiumoxid, Siliziumkarbid, Titandioxid, Eisenoxid und für den Hochglanz Diamantpartikel.

Als Referenzbearbeitungsmethode wurden Sof-Lex Disks eingesetzt. Durch die Abstufung in mehrere Körnungen ist sowohl eine Ausarbeitung als auch eine Politur möglich. Die aluminiumoxidbeschichteten flexiblen Disks gelten als klinischer Standard, da sie sich über längere Zeiträume sehr gut bewährt haben, was zahlreiche Studien bestätigen [Wilson et al, 1990; Jung et al. 2003, Turssi et al.2000, Tate et al. 1996]. Daher sollte diese Methode als Referenz dienen, um die Resultate der drei Poliersysteme einordnen zu können.

5.1.4 Bearbeitung der Prüfkörper

Die Untersuchungsergebnisse werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Bei der Bearbeitung der Prüfkörper spielen Kriterien wie Umdrehungszahl, Wasserkühlung und Bearbeitungsdauer eine wichtige Rolle für die endgültige Oberflächenrauigkeit. Bei der Anwendung der Finier- und Polierinstrumente wurden daher die Herstellerangaben genau berücksichtigt. Um Verschleißerscheinungen der Bearbeitungsinstrumente vorzubeugen, welche die Ergebnisse negativ beeinflussen könnten, und um gleichbleibende Untersuchungsbedingungen zu schaffen, wurde jeder Finierer nach der Präparation von fünf Prüfkörpern ausgetauscht. Für jede Probenoberfläche wurde ein neues Polierinstrument verwendet. Die Ausarbeitung und Politur erfolgt manuell, um klinische Bedingungen möglichst gut zu simulieren.

Die jeweilige Erfahrung, Fertigkeit und Konzentration der ausführenden Person kann ebenfalls das Ergebnis beeinflussen. In einer Untersuchung von Jung et al. (2008) kam es zu signifikanten Unterschieden in den Rauigkeitswerten von Kompositoberflächen, wenn die Politur durch verschiedene Personen durchgeführt worden ist. Die jeweilige Erfahrung der Testpersonen korrelierte jedoch nicht positiv mit der Oberflächenqualität nach der Politur. Um aussagekräftigere Rauigkeitswerte zu erzielen, wurde in der vorliegenden Studie das Finieren und Polieren von zwei verschiedenen Testpersonen durchgeführt.

Bei der Ausarbeitung und Politur der Prüfkörper erfolgte die Auswahl der Bearbeitungsmethode und des Komposittyps nach einem randomisierten Protokoll. Das diente zum Ausschließen von Gewöhnungs- und Übungseffekten.

5.1.5 Quantitative Beurteilung mittels Profilometer

In der vorliegenden Studie wurde zur quantitativen Analyse der Kompositoberflächen die Profilometrie eingesetzt. Sie stellt das am häufigsten angewendete Verfahren zur Erfassung von Oberflächenrauigkeiten in der Zahnheilkunde dar. Zur Durchführung der Tastschnittuntersuchung kam ein Focodyn-Lasertaster zum Einsatz. Dieser bietet gegenüber mechanischen Abtastsystemen, die in vielen Untersuchungen verwendet werden, einige Vorteile. Im Gegensatz zur mechanischen Tastspitze untersucht der optische Mikrotaster die

Probenoberfläche präziser. Ein Focusdurchmesser von 1 μm ermöglicht die Auflösung von minimalen Profilunregelmäßigkeiten. Der Spitzendurchmesser der Diamantnadel mechanischer Tastsysteme beträgt hingegen zwischen 6 und 20 μm . Die Rautiefen polierter Oberflächen liegen jedoch häufig deutlich unter diesen Werten. Bei feineren Oberflächenstrukturen können sich somit größere Messungenauigkeiten ergeben [Joniot et al., 2000; Jung, 1998; Wassell et al., 1994]. Weiterhin werden durch das berührungslose Abtasten des Lasertasters unerwünschte Beschädigungen der Prüfkörperoberfläche vermieden. Bei mechanischen Tastern kann es hingegen zu Beschädigungen der abzutastenden Oberfläche sowie zum Verschleiß der Tastnadel kommen, woraus weitere Ungenauigkeiten resultieren können [Pelka et al., 1993].

Zur quantitativen Beurteilung der Kompositoberflächen wurden als Oberflächenkenngrößen der arithmetische Mittenrauwert R_a und das Profillängenverhältnis LR gewählt. Der arithmetische Mittenrauwert R_a wird vorrangig in Rauigkeitsuntersuchungen zur Beschreibung der Oberflächenqualität herangezogen. Um eventuelle Vergleiche zu anderen Studien zu ermöglichen, wurde der Parameter R_a auch in dieser Untersuchung verwendet. R_a beurteilt lediglich die vertikale Dimension. Allein über Profilamplituden kann jedoch noch keine hinreichende Aussage über die Form der Oberfläche gemacht werden [Jung, 1998]. Da eine Messgröße allein für eine umfassende und anschauliche profilometrische Oberflächenbeurteilung nicht genügt, wurde das Profillängenverhältnis als zweiter Parameter genutzt. Neben der vertikalen gibt es auch die horizontale Dimension einer Oberfläche wieder und gibt Hinweise beispielsweise auf die Anzahl der Profilunregelmäßigkeiten. Je größer die Anzahl oder die Ausprägung der Profilunregelmäßigkeiten ist, desto größer wird auch die Länge des gestreckten Profils und damit LR [Jung, 1998]. Eine hohe Zahl an Profilunregelmäßigkeiten führt somit zu einem großen Profillängenverhältnis bei niedrigem R_a -Wert. Umgekehrt weist ein im Vergleich zum Profillängenverhältnis großer arithmetischer Mittenrauwert auf wenige aber dafür ausgeprägte Riefen hin. Diese Zusammenhänge konnten bei der Evaluierung der Kompositoberflächen nach Politur durch Bearbeitungsmethode 2 und 10 beobachtet werden. Die REM-Aufnahmen der von Methode 2 bearbeiteten Oberflächen zeigten, dass die groben Profilunregelmäßigkeiten des Diamantfinierers nach Politur durch OptiShine kaum eingeebnet werden konnten. Es war also ein hoher R_a -Wert und ein relativ kleiner LR-Wert zu erwarten. Im Gegensatz dazu wurden die von Sof-Lex Disks bearbeiteten Prüfkörperoberflächen von zahlreichen flachen Polierriefen dominiert, was für ein hohes Profillängenverhältnis spricht. Die profilometrische Auswertung der Oberflächen nach LR

und R_a bestätigte die Hypothese. Während bei der Betrachtung der R_a -Werte Methode 2 hochsignifikant höhere arithmetische Mittenrauwerte als Methode 10 aufwies, waren bezüglich des Profillängenverhältnis die Werte beider Methoden fast gleich, d.h. bei Methode 2 zeigte sich ein geringerer LR-Wert im Vergleich zu R_a und bei Methode 10 ein deutlich höherer LR-Wert in Relation zu R_a . Daraus wird deutlich, dass durch die vergleichende Betrachtung beider Messparameter R_a und LR differenziertere Aussagen über die Oberflächenqualität getroffen werden können, als unter alleiniger Zuhilfenahme des arithmetischen Mittenrauwertes.

5.1.6 Qualitative Beurteilung mittels REM

Um komplexe Oberflächenstrukturen umfassend zu charakterisieren, müssen neben quantitativer Oberflächenevaluierung auch qualitative Verfahren zum Einsatz kommen. Sie ermöglichen eine Interpretation der quantitativen Ergebnisse. Die qualitative Beurteilung der Kompositoberflächen erfolgte in dieser Studie mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes, das zu diesem Zweck am häufigsten angewendete Verfahren. In wenigen Untersuchungen wurden die Prüfkörperoberflächen auch lichtmikroskopisch betrachtet. Im Vergleich zum Lichtmikroskop erreicht das REM ein deutlich höheres Auflösungsvermögen und eine stärkere Tiefenschärfe. Die Oberfläche eines Gegenstandes kann realistisch und dreidimensional dargestellt werden. Somit ist es möglich, zwischen Rauigkeiten, die vom Schleifinstrument hinterlassen wurden und herstellungsbedingten Fehlern in der Oberfläche wie z.B. Porositäten zu unterscheiden. Ein Vergleich der von den verschiedenen Bearbeitungsmethoden hinterlassenen Oberflächenstrukturen kann Rückschlüsse auf deren Eignung geben [Türkün, 2004].

Wie bei allen mikroskopischen Untersuchungstechniken kann auch mit dem Rasterelektronenmikroskop durch die hohe Vergrößerung nur ein kleiner Ausschnitt abgebildet werden. Deshalb ist bei starker Vergrößerung die Beurteilung der Gesamtoberfläche nur bedingt möglich. Eine Bewertung über die Ausprägung von Rauigkeiten kann bei qualitativen Verfahren nur annäherungsweise erfolgen und ist von mehreren Faktoren, wie z.B. dem Neigungswinkel des Präparates, abhängig [Goldstein et al., 1989]. Die Auswertung der Betrachtungen ist subjektiv, daher sind Vergleiche mit Resultaten anderer Studien schwer. Ein weiterer Nachteil ist der große apparative Aufwand. Die

Prüfkörperoberflächen müssen vor der Betrachtung, wegen fehlender Leitfähigkeit, mit Gold bedampft werden (Sputtern) und stehen dann für weitere Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung.

5.2 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

5.2.1 Einfluss der Kompositmaterialien

Bei Betrachtung der profilometrischen Ergebnisse wird deutlich, dass sich die vier Nanokomposite bezüglich der Oberflächenrauigkeit deutlich unterscheiden und keine einheitliche Gruppe bilden. Bei vergleichender Betrachtung der Gesamtmittelwerte jedes einzelnen Komposites nach Anwendung der vier Poliersysteme ergab sich sowohl in Bezug auf R_a als auch LR die gleiche Rangfolge.

Die Nanokomposite Premise und Tetric Evo Ceram wiesen signifikant geringere R_a -Werte auf als Herculite XRV, Ceram X Duo und Filtek Supreme ($p < 0,001$) und signifikant geringere LR-Werte als Herculite XRV und Ceram X Duo. Laut Manhart (2006) integrieren sich bei den nanotechnologisch modifizierten Kompositen die einzelnen nicht agglomerierten Nanofüller gleichmäßiger in die organische Matrix, was einen geringeren Füllkörperverschleiß und somit eine höhere Oberflächengüte bewirken soll. Dies könnte ein möglicher Grund für die geringe Oberflächenrauheit von Premise und Tetric Evo Ceram Prüfkörpern sein. Des Weiteren könnten die guten Polierresultate der beiden Nanohybridkomposite auf deren Füllkörpergehalt basieren. Beide Komposite weisen ein höheres Füllervolumen (Premise: 69 Vol.-%, Tetric Evo Ceram 68 Vol.-%) auf, als die anderen untersuchten Materialien (Filtek Supreme: 59,9-Vol%, Ceram X Duo: 57 Vol.-%, Herculite: 59 Vol.-%). Durch den hohen Volumenanteil der Füller wird die Angriffsfläche der Polierpartikel auf die weiche, leicht abzutragende Matrix reduziert, während die Angriffsfläche auf die Füllkörper vergrößert wird. Daher wird im Vergleich zu den anderen Kompositen die Oberfläche gleichmäßiger abgetragen. Auf die Schwierigkeit der gleichmäßigen Einebnung von weicher Matrix und anorganischen Füllpartikeln aufgrund unterschiedlicher Härte wurde in der Literatur bereits mehrfach hingewiesen [Hellwig et al., 2003, Lutz et al., 1983; Williams et al., 1993]. Der hohe Füllkörpergehalt der beiden Komposite kommt durch den Einsatz der Vorpolymerisate zustande. Durch die Matrixbestandteile der Vorpolymerisate können die Präpolymere bei der Polymerisation

gleichmäßiger in die Matrix integriert werden. Dadurch könnte eine intensive chemische Verankerung ermöglicht werden, was neben der Silanisierung letztlich zur verbesserten Integration der Füller in die Matrix führen könnte. Somit wird ein Herauslösen von Füllpartikeln aus der Matrix erschwert. Die Vorpolymerisate enthalten Nanofüller. Dadurch soll die Bildung von Rissen zwischen Präpolymer und organischer Matrix verhindert werden, was bei den inhomogenen Mikrofüllerkompositen immer wieder zu Problemen führte. Die gute Oberflächenglättung von Premise und Tetric Evo Ceram konnte anhand der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bestätigt werden. Speziell die mit Astropol polierten Tetric Evo Ceram und Premise Prüfkörper wiesen im Vergleich zu den anderen Kompositen eine gleichmäßige homogene Oberfläche auf.

Bei Betrachtung des Gesamtmittelwertes aller Polierverfahren zeigte das Nanofüllerkomposit Filtek Supreme bezüglich des arithmetischen Mittenrauwertes keine geringere Oberflächenrauigkeit als das traditionelle Hybridkomposit Herculite XRV. Die R_a -Werte zwischen beiden Kompositen waren annähernd gleich. Mögliche Gründe für die im Vergleich zu Premise und Tetric Evo Ceram schlechtere Oberflächenqualität könnten in der speziellen Nanofüllertechnologie liegen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, enthält Filtek Supreme als Füllkörper einzelne Nanomere (20-75 nm) und Agglomerate von Nanomeren, sogenannte Nanocluster (0,6-1,4 μm). Es besteht die Möglichkeit, dass es beim Polieren zum Verlust der Cluster gekommen ist und daraus höhere Rautiefen resultieren.

Das Nanohybridkomposit Ceram X Duo wies im Vergleich zu den anderen untersuchten Kompositen die größten R_a - und LR-Werte auf. Ursache dafür könnte sowohl der Füllkörpergehalt als auch die Füllkörpergröße sein. Ceram X Duo weist das geringste Füllkörpervolumen (57 Vol.-%) von allen untersuchten Materialien auf. Aufgrund dessen wird die Angriffsfläche der Polierkörperpartikel auf die Matrix vergrößert, welche weicher und damit leichter abzutragen ist als die härteren Füllpartikel. So könnte es zu einer verstärkten Ausprägung von Rauigkeiten nach rotierender Bearbeitung gekommen sein. Neben dem Füllkörpergehalt übt auch die Füllkörpergröße einen wichtigen Einfluss auf die Oberflächenqualität eines Komposites aus. Ceram X Duo enthält wie auch die anderen Nanohybridkomposite neben den Nanofüllern konventionelle Glasfüller. Im Vergleich zu Tetric Evo Ceram (0,4-0,7 μm), Premise (0,4 μm) und Herculite XRV (0,3-0,6 μm) sind die Füllkörper von Ceram X Duo mit einer Partikelgröße von 1,1-1,5 μm deutlich größer, was zu höheren Rauigkeitswerten geführt haben könnte.

Bei Betrachtung der Rauigkeitsparameter R_a und LR wird deutlich, dass nach Bearbeitung der Ceram X Duo-Oberflächen durch flexible Disks im Vergleich zu den anderen Nanokompositen auffällig höhere Werte auftraten. Daraus folgend erscheinen Sof-Lex Disks für die Politur von Ceram X Duo nur bedingt geeignet. Die rasterelektronenmikroskopische Auswertung konnte in diesem Fall den profilometrischen Befund nicht bestätigen. Auf den REM-Aufnahmen zeigten die mit Sof-Lex Disks bearbeiteten Ceram X Duo Oberflächen keine schlechtere Oberflächenqualität als bei den anderen Poliersystemen. Im Vergleich zu den anderen Kompositen erschien die mit Sof-Lex Disks bearbeiteten Ceram X Duo Oberflächen sogar noch glatter. Diese Diskrepanz könnte möglicherweise darauf zurückzuführen sein, dass bei der Auswertung der REM-Aufnahmen die Profilamplituden lediglich abgeschätzt werden können, während sie bei der profilometrischen Erfassung explizit bestimmt werden.

Des Weiteren könnten die hohen Rauigkeitswerte bei Ceram X Duo möglicherweise auch in der Applikationsform (Minikarpulen) begründet sein. Wie bereits in Kapitel 5.1.2 erwähnt wurde bei der Voruntersuchung aller Prüfkörper unter dem Stereomikroskop deutlich, dass die Prüfkörper von Ceram X Duo häufig inhomogene Oberflächen aufwiesen. Zwar wurden Prüfkörper mit Unregelmäßigkeiten, wie Porositäten aussortiert, jedoch kann der durch die Bearbeitung entstandene Materialabtrag eventuelle dicht unter der Oberfläche befindliche Porositäten freilegen. Bei der profilometrischen Untersuchung tastet dann der optische Mikrotaster neben den Bearbeitungsspuren auch die oberflächlichen Poren ab, wodurch es zu einer Verstärkung der Rautiefenamplituden kommen könnte, was die erhöhten Rauigkeitswerte erklären würde.

5.2.2 Einfluss der Bearbeitungsmethoden

Die Auswertung der profilometrischen Messergebnisse sowie der REM- Aufnahmen der bearbeiteten Prüfkörperoberflächen zeigt, dass sich bei allen drei Poliersystemen die Vorbehandlung mit dem Ausarbeitungsverfahren 3 (AV3- DF30/HMF) am günstigsten auf das endgültige Polierresultat auswirkte. Unabhängig vom angewendeten Poliersystem führte die alleinige Ausarbeitung mit einem 30 μm Diamantfinierer (AV1) und die anschließende Politur zu den höchsten Rauigkeitswerten. Hervorzuheben ist, dass der Einfluss der initialen Behandlung durch die Finierer auf das endgültige Politurresultat umso stärker war, je weniger Polierschritte das jeweilige System hatte.

Bei den Polierv Verfahren Astropol und Enhance/PoGo zeigte die Vorbehandlung mit den drei verschiedenen Ausarbeitungsverfahren keinen signifikanten Einfluss auf die Politurresultate. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bestätigten diese Befunde. Zurückgebliebene Bearbeitungsspuren der Diamant- und Hartmetallfinierer waren nicht vorhanden. Die Abrasivpartikel der ersten Polierstufe der Enhance/PoGo- und Astropolkelche sind sehr groß ($40\text{ }\mu\text{m}$ und $36,5\text{ }\mu\text{m}$) und reichen an die Korngröße der Diamantfinierer heran. Aufgrund dieser Tatsache konnten bereits im ersten Polierschritt die Bearbeitungsspuren der Diamant- und Hartmetallfinierer geglättet werden. Daraus kann man schließen, dass bei den beiden genannten Poliersystemen die Art und Güte der Vorbehandlung geringeren Einfluss auf das Politurergebnis hat, da die darauffolgenden Polierkörper in der Lage sind, dem Oberflächenprofil eine eigene Struktur zu geben.

Bei dem einstufigen Poliersystem OptiShine hingegen hatte die jeweilige Vorbehandlung durch die Diamant- und Hartmetallfinierer einen hochsignifikanten Einfluss auf die endgültige Oberflächenrauigkeit ($p < 0,001$). Die Anwendung eines $30\text{ }\mu\text{m}$ Diamantfinierers zur Vorbehandlung erzielte bei allen fünf Kompositen ungenügende Politurergebnisse, so dass es zu einer großen Heterogenität in den Rauigkeitswerten kam und die statistische Analyse beeinträchtigt wurde. Deshalb wurden die R_a - und LR-Werte der Methode 2 in der prüfstatistischen Auswertung nicht berücksichtigt. Durch die zusätzliche Verwendung eines feinen Diamantfinierers (Methode 5) bzw. eines Hartmetallfinierers (Methode 8) konnte die Oberflächerrauigkeit sukzessiv verringert werden. Die REM-Aufnahmen verdeutlichen diese Zusammenhänge besonders gut. Bei allen untersuchten Kompositen zeigte sich nach der Bearbeitungsmethode 2 (DF 30/ OptiShine) eine noch ausgeprägte starke Riefenbildung des Diamantfinierers auf der gesamten Prüfkörperoberfläche. Durch die zusätzliche Anwendung des $20\text{ }\mu\text{m}$ Diamantfinierers (Methode 5) und des Hartmetallfinierers (Methode 8) blieben die Schleifspuren zwar noch teilweise erhalten, aber es wurde eine deutliche Verfeinerung der Kompositoberfläche erzielt. Die kleinen Abrasivpartikel ($5\text{ }\mu\text{m}$) des OptiShine Bürstchens konnten tiefere Spuren der Diamant- und Hartmetallfinierer offensichtlich nicht beseitigen. Es wurden lediglich einzelne Profilsitzen abgetragen und so nur eine geringfügige Glättung der Oberfläche erreicht. War durch die Vorbehandlung bereits eine Oberfläche mit geringen Rautiefen entstanden (nach AV3), konnte das Bürstchen die Oberfläche effektiv glätten. Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen eignet sich Methode 2 nicht für die Politur von Kompositoberflächen. Die Bearbeitungsmethode 8 erreichte akzeptable

Politurergebnisse. Zusammenfassend ist zu sagen, dass bei Verwendung des OptiShine Polierbürstchens, wie bei allen einstufigen Polierverfahren, eine ausreichend vorbereitende Oberflächenglättung bereits beim Finieren von besonderer Bedeutung ist.

Bei Betrachtung der profilometrischen Ergebnisse wird deutlich, dass die Oberflächenrauigkeit der Kompositprüfkörper umso geringer war, je mehr Polierschritte das jeweilige System hatte. Das dreistufige Poliersystem Astropol erzielte die besten Politurresultate. Das Zweischrittsystem Enhance/PoGo und Einschrittsystem OptiShine waren konsequent weniger effizient.

Das dreistufige Poliersystem Astropol erzielte die beste Politur auf allen untersuchten Kompositoberflächen. Die Rauigkeitswerte waren am geringsten und die Oberfläche erschien im Rasterelektronenmikroskop zum größten Teil glatt und homogen, mit vereinzelt leichten Polierriefen. Die erste Polierstufe (Korngröße 36,5 µm) glättete die von den Finierern hinterbliebenen Rauigkeiten. Der dritte Polierer enthält 3,5 µm kleine Diamantpartikel als Abrasivkörper, die den Hochglanz bewirken. Im Vergleich zu den anderen Poliersystemen weist somit Astropol in der letzten Polierstufe die kleinsten Abrasivpartikel auf, so dass eine geringere Oberflächenrauigkeit erzielt werden konnte. Die stufenweise Reduzierung der Rautiefen erleichterte dem einzelnen Polierer die volle Entfaltung seiner Polierwirkung, da mit einer bestimmten Körnung der Abrasivpartikel auch nur bestimmte Rauigkeiten der Ausgangsoberfläche geglättet werden konnten. Neben der Korngröße der Polierkörper spielt auch die Härte der Abrasivpartikel eine entscheidende Rolle für die guten Politurergebnisse von Astropol. Die Al_2O_3 - (Härte 9 nach Mohs) und Siliziumkarbidpartikel (Härte 9-10 nach Mohs) weisen eine signifikant höhere Härte auf, als die Kompositfüllkörper [Chung, 1994]. Effektive Poliersysteme für Komposite müssen härtere Abrasivpartikel haben als die Füllkörper. Dies gewährleistet ein gleichmäßiges Abtragen von weicher Matrix und harten Füllkörpern [Tjan et al., 1989].

Die mit dem Zweischrittsystem Enhance/PoGo polierten Kompositoberflächen zeigten höhere Rauigkeitswerte als die von Astropol. In den REM-Aufnahmen wird deutlich, dass die höheren Werte durch Bearbeitungsspuren der Enhance-Polierer verursacht wurden, da keine Riefen der Diamant- und Hartmetallfinierer mehr zu erkennen waren. Vielmehr wurde die Oberfläche von ungeordneten, bogenförmig verlaufenden Polierriefen dominiert. Die Enhance-Polierer beseitigten mit ihrer sehr hohen Abrasivität, die in den Al_2O_3 - Partikeln

und deren Korngröße (40 μm) begründet ist, zwar die Riefen der Vorbehandlung, hinterließen jedoch auch selbst tiefe Spuren. Durch die geringe Körnung der Diamantpartikel (7 μm) der darauffolgenden PoGo- Polierer konnten die vom ersten Schritt hinterlassenen tiefen Riefen nicht vollständig geglättet werden.

Abgesehen von der Referenzmethode hinterließ das einstufige Poliersystem OptiShine die höchsten Oberflächenrauigkeiten. Die große Härte der Siliziumkarbidpartikel (Härte nach Mohs: 9-10) müsste eigentlich einen gleichmäßigen Materialabtrag und Glättungseffekt bewirken. Daher korreliert die unzureichende Abrasivität vermutlich mit der geringen Korngröße (5 μm) der Siliziumkarbidpartikel. Die nach der Ausarbeitung mit den Diamantfinierern erzielte Glättung der Oberfläche reichte nicht aus. Der Polierer konnte womöglich in Anbetracht der verbliebenen Oberflächenrauigkeiten seine Wirkung nicht entfalten. Das OptiShine Bürstchen war somit nicht in der Lage, dem Oberflächenprofil eine eigene Struktur zu geben, sondern konnte nur eine bestehende Struktur geringfügig glätten. Eine weitere mögliche Ursache für die unzureichende Politur könnte darin bestehen, dass die Siliziumkarbidpartikel nicht ausreichend fest mit den Borstenfilamenten verbunden sind. Weiterhin ist denkbar, dass durch die Integration der Siliziumkarbidpartikel in die Kunststoffmatrix der Polierbürstchen es zu einer nicht ausreichenden Verfügbarkeit der Polierpartikel kommt.

Die drei untersuchten Poliersysteme waren, mit Ausnahme der Bearbeitungsmethode 2 (DF30/OS), der Referenzmethode deutlich überlegen. Die Sof-Lex Disks erzielten signifikant die größten R_a - und LR-Werte auf allen untersuchten Kompositoberflächen ($p < 0,001$). Auch auf den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen waren keine glatten homogenen Areale zu erkennen. Die Oberfläche wurde vielmehr von zurückgebliebenen Polierriefen in unterschiedlicher Ausprägung gekennzeichnet. Die flexiblen Al_2O_3 - beschichteten Scheiben gelten als klinischer Standard [Wilson et al., 1990]. Dies kann in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden, da die Polierresultate im Vergleich zu den neuen alternativen Poliertechniken ungenügend ausfielen.

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Autoren

Die Oberflächenrauigkeit von Nanokompositen wurde bislang erst in wenigen Studien untersucht. In vier verschiedenen Publikationen wurde das Nanofüllerkomposit Filtek Supreme mit herkömmlichen Kompositen verglichen [Baseren et al., 2004; Silikas et al., 2004; Turssi, 2005; Yap, 2004b]. In der vorliegenden Untersuchung waren die durchschnittlichen arithmetischen Mittenrauwerte von Filtek Supreme nur minimal geringer als bei dem Referenzmaterial Herculite XRV. Zwischen dem Nanofüllerkomposit und dem Mikrohybridkomposit bestand somit kein signifikanter Unterschied. Dieser Sachverhalt stimmt mit den Ergebnissen anderer Studien überein. Turssi et al. (2005) verglich das Nanofüllerkomposit mit einem Mikrohybridkomposit bezüglich der Oberflächenrauigkeit. Filtek Supreme zeigte dabei geringere R_a -Werte, jedoch war die Differenz zu dem Mikrohybridkomposit nicht signifikant. Auch in einer anderen Studie wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Filtek Supreme und einem Mikrofüller- sowie Mikrohybridkomposit registriert. Allerdings wies in dieser Arbeit einOrmocer signifikant geringere R_a -Werte auf als das Nanofüllerkomposit [Yap et al., 2004b]. In einer Untersuchung von Baseren (2004) wurden ebenfalls bei einem Ormocer geringere Rauigkeitswerte als bei Filtek Supreme gemessen. Silikas et al. (2005) untersuchte die Oberflächenrauigkeit von Filtek Supreme und drei verschiedenen Mikrohybridkompositen nach der Politur mit Sof-Lex Disks. Die Rauigkeitswerte des Nanofüllerkomposites waren signifikant geringer als die von zwei Mikrohybridkompositen, deren durchschnittliche Füllkörpergröße bei 0,6 und 0,7 μm lag. Das dritte untersuchte Mikrohybridkomposit mit einer Füllpartikelgröße von 0,2 μm erzielte einen geringeren durchschnittlichen R_a -Wert als Filtek Supreme [Silikas et al., 2005]. Das in der vorliegenden Untersuchung als Referenzmaterial angewandte Mikrohybridkomposit weist eine durchschnittliche Füllkörpergröße von 0,3-0,6 μm auf und zeigte nur minimal höhere R_a -Werte als Filtek Supreme.

In einer Studie von Heintze et al. (2005) wurde die Oberflächerauigkeit von dem Nanohybridkomposit Tetric Evo Ceram nach Politur mit Astropol gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass Tetric Evo Ceram einerseits geringere Rauigkeitswerte als ein Mikrohybridkomposit aufwies, andererseits aber höhere Rautiefen als ein Mikrofüllerkomposit zeigte [Heintze et al., 2005]. In der vorliegenden Untersuchung wurden, in Übereinstimmung mit Heintze et al., auf den Tetric Evo Ceram Oberflächen signifikant

geringere R_a -Werte als auf den Probenoberflächen des Mikrohybridkomposites Herculite XRV gemessen.

Ergücü et al. (2007) untersuchte mit drei verschiedenen einstufigen Poliersystemen die Oberflächenqualität der gleichen Nanokomposite wie in der vorliegenden Studie. Bei Betrachtung der R_a -Werte nach Politur mit PoGo als einstufiges System fällt auf, dass eine umgekehrte Rangfolge als in der vorliegenden Arbeit besteht. Das heißt, Ceram X wies die glättesten Oberflächen auf, gefolgt von Filtek Supreme, Tetric Evo Ceram und Premise mit den höchsten Werten. Senawongse et al. (2007) polierten Nanokomposite mit abrasiven Scheiben und Silikonpolierern. Dabei wurden im Gegensatz zu der hier vorliegenden Studie auf den polierten Prüfkörperoberflächen des Nanofüllerkomposites Filtek Supreme geringere R_a -Werte als bei den Nanohybridkompositen Tetric Evo Ceram und Premise nachgewiesen. Korkmaz et al. (2008) ermittelte nach Politur mit verschiedenen Poliersystemen im Gegensatz zu dieser Studie für Tetric Evo Ceram Oberflächen deutlich höhere arithmetische Mittenrauwerte als für Filtek Supreme und Ceram X. Mögliche Gründe für die Differenzen zu der vorliegenden Untersuchung könnten darin liegen, dass die genannten Studien keine Vorbehandlung mit Finierern durchführten und andere Poliersysteme angewandt wurden.

Ein direkter Vergleich von Rauheitswerten zwischen verschiedenen Studien ist nur eingeschränkt möglich, da die Ergebnisse durch zahlreiche Faktoren beeinflusst werden. Zum einen spielen die Untersuchungsbedingungen bei der Bearbeitung der Prüfkörper (manuelle oder maschinelle Bearbeitung, Umdrehungszahl, Wasserkühlung, Anpressdruck, Bearbeitungsdauer) eine wichtige Rolle, zum anderen ist Messmethodik (Wahl des Tastsystems, Länge der Messstrecke, Wellenfilterung) von Bedeutung für das endgültige Resultat. In drei Untersuchungen wurden geringere R_a -Werte für Filtek Supreme gemessen, als in der vorliegenden Arbeit. So wurde nach Politur des Nanofüllerkomposites mit Sof-Lex Disks ein durchschnittlicher R_a -Wert von $0,125\text{ }\mu\text{m}$ ermittelt [Silikas et al, 2004]. Der korrespondierende Rauheitswert der vorliegenden Studie beträgt das Vierfache ($R_a=0,5\text{ }\mu\text{m}$). Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Autoren einen mechanischen Taster mit einem Tastspitzenradius von $5\text{ }\mu\text{m}$ zur profilmetrischen Messung einsetzten. Wie bereits in Kapitel 5.1.5 erläutert, untersucht der optische Mikrotaster, im Gegensatz zum mechanischen Profilometer, die Probenoberfläche präziser und kann deshalb zu größeren Messwerten führen. In zwei anderen Studien wurden Filtek Supreme Prüfkörper ebenfalls mit flexiblen Scheiben (Super Snap, Shofu) bearbeitet. Die gemessenen R_a -Werte (Yap et al., 2004b: $R_a=0,33\text{ }\mu\text{m}$; Baseren, 2004: $R_a=0,13\text{ }\mu\text{m}$) lagen auch hier deutlich unter den von uns

gemessenen $R_a=0,5\text{ }\mu\text{m}$. Genaue Angaben zu der Messmethodik, speziell zu den Tastertypen, wurden in den beiden Studien nicht gemacht. Die Differenzen zu den vorliegenden Messergebnissen könnten aber auch in der Art der unterschiedlichen Scheibensysteme begründet sein. Auch wurde in beiden Studien, im Gegensatz zu der vorliegenden Untersuchung, ohne Wasserkühlung und mit einer größeren Drehzahl gearbeitet.

Die Auswertung der profilometrischen Messergebnisse sowie der REM- Aufnahmen der bearbeiteten Prüfkörperoberflächen zeigt, dass bei allen drei Poliersystemen die Vorbehandlung mit dem Ausarbeitsverfahren 3 (AV3- DF30/HMF) zu den geringsten Rautiefen nach endgültiger Politur führten. Dies entspricht den Ergebnissen einer Studie von Jung et al. (1997), in der ein Einschrittpolierer, ein diamantimprägniertes Filzrad, in Kombination mit verschiedenen Ausarbeitsverfahren getestet worden war. Dabei wurden ebenfalls die besten Politurresultate erzielt, wenn die initiale Ausarbeitung mit einem Diamant- und einem Hartmetallfinierer durchgeführt wurde. Die Differenz zu den anderen untersuchten Ausarbeitsverfahren war statistisch signifikant. In einer weiteren Studie von Jung et al. (2003) wurden neben multi-step verschiedene one-step Poliersysteme untersucht. Als vorbereitende Ausarbeitung wurden die gleichen Verfahren wie in der vorliegenden Untersuchung angewendet. Bei zwei von den untersuchten Einschrittverfahren erzielte die alleinige Vorbehandlung mit einem $30\text{ }\mu\text{m}$ Diamantfinierer signifikant größere R_a -Werte als nach Vorbehandlung in zwei Schritten. Diese beiden einstufigen Poliersysteme wiesen, wie OptiShine, eine kleine Abrasivkörpergröße ($1\text{ }\mu\text{m}$ und $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$) auf. Das dritte untersuchte einstufige Polierv Verfahren mit einer Korngröße von $85\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ wurde dagegen nicht durch die Ausarbeitsverfahren beeinflusst, hinterließ jedoch selbst große Rauigkeiten [Jung et al., 2003]. Turssi et al. (2004) wählte für die Vorbehandlung einmal die Kombination aus zwei Hartmetallfinierern mit jeweils 12 und 30 Schneiden, als auch die Kombination aus einem $15\text{ }\mu\text{m}$ und einem $30\text{ }\mu\text{m}$ Diamantfinierer. Die Politur erfolgte mit zwei unterschiedlichen einstufigen Poliersystemen. Bei beiden Polierv Verfahren wurden signifikant geringere R_a -Werte gemessen, wenn die Prüfkörper mit den Hartmetallfinierern vorbehandelt wurden. In einer anderen Untersuchung wurden zwei mehrstufige Poliersysteme an zwei Nanokompositen und einem Ormocer getestet. Bei beiden Polierv Verfahren wurden geringere Rauigkeitswerte ermittelt, wenn die Prüfkörperoberflächen mit einem Hartmetallfinierer vorbehandelt wurden. Eine vorbereitende Ausarbeitung mit einem Diamantfinierer erzielte hingegen auf allen untersuchten Kompositoberflächen größere Rautiefen [Baseren, 2004]. Die beiden letztgenannten Studien stimmen mit den Ergebnissen der eigenen Untersuchung

überein, da die Oberflächenqualität in der vorliegenden Arbeit ebenfalls nach der Vorbehandlung mit Hartmetallfinierern verbessert wurde.

In vielen Studien wird die Effektivität von einstufigen und mehrstufigen Poliersystemen untersucht. Die Ergebnisse der verschiedenen Arbeiten variieren deutlich. Der Nutzen beider Anwendungsarten wird noch kontrovers diskutiert. Übereinstimmend mit den Ergebnissen dieser Studie, erzielten bei Watanabe et al. (2005) mehrstufige Poliersysteme deutlich geringere Rauheitswerte als einstufige Verfahren. Gedik et al. (2005) verglich die Polierbarkeit von Multi-Step Systemen, wie Astropol, Sof-Lex Disks und Enhance mit einem Polierbürstchen, welches dem OptiShine Bürstchen in der Anwendung ähnelt. Wie auch in der vorliegenden Studie wurden nach Politur mit dem Polierbürstchen die signifikant rauesten Oberflächen gemessen. Zwischen den mehrstufigen Verfahren wurden keine größeren Differenzen festgestellt [Gedik et al., 2005].

In anderen Untersuchungen wurden im Gegensatz zu der vorliegenden Studie keine signifikanten Unterschiede zwischen Einschritt- und Mehrschrittsystemen in Bezug auf die Oberflächenrauigkeit gefunden [Yap et al., 2004a; St-Georges et al., 2005; Korkmaz et al., 2008]. Yap et al. (2004a) verglichen die Effektivität von einstufigen und mehrstufigen Polierverfahren auf einem Mikrofüllerkomposit und einem Kompomer. Für das Mikrofüllerkomposit wurden keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Oberflächenrauigkeit zwischen den einstufigen und mehrstufigen Verfahren beobachtet. Dagegen wiesen die Kompomer Prüfkörper nach Politur mit zwei Einschrittsystemen signifikant geringere R_a -Werte auf, als die mehrstufigen Poliersysteme [Yap et al., 2004a]. In einer aktuellen Studie wurden auf den Oberflächen der Nanokomposite Filtek Supreme und Ceram X ebenfalls keine signifikanten Differenzen bezüglich der Oberflächenrauigkeit zwischen einstufigen Poliersystemen und Sof-Lex Disks ermittelt [Korkmaz et al., 2008].

Wie bereits in Kapitel 5.1.3 erwähnt, wird in einigen Studien PoGo als einstufiges Poliersystem angewendet [Paravina et al., 2004; St. Georges et al., 2005; Turssi et al., 2004; Türkün, 2005; Ergucu et al., 2007]. Paravina et al. (2004) untersuchten mehrstufige (Astropol, Sof-Lex Disks und Enhance-Polierer) und einstufige Verfahren (PoGo) auf Mikrofüller- und Mikrohybridkompositen. Dabei wies PoGo im Vergleich zu den mehrstufigen Verfahren die geringsten R_a -Werte auf allen untersuchten Kompositoberflächen auf. In einer Studie von Türkün (2004) erzielte das PoGo System glattere Oberflächen als Sof-Lex Disks und Enhance Polierer (Zweischrittsystem). Ergücü et al. (2007) verglich PoGo mit zwei anderen einstufigen Poliersystemen. Die dabei von PoGo polierten

Nanokompositoberflächen wiesen geringere R_a -Werte auf [Ergücü et al., 2007]. In einigen Untersuchungen wurden bei der Politur mit dem PoGo System, die nach Herstellerangaben empfohlenen unterschiedlichen Anpressdrücke angewendet [Türkün, 2004; St. Georges et al., 2005; Ergücü et al., 2007]. Fruits et al. berichteten, dass der Anpressdruck und die Polierbewegung während der Bearbeitung einen signifikanten Effekt auf die Qualität der polierten Oberfläche hatten [Fruits et al., 1996].

5.4 Klinische Relevanz der Ergebnisse

Die Oberflächenqualität von Kompositfüllungen hat direkten Einfluss auf die Plaqueakkumulation, den Verschleiß und die Ästhetik der Restauration. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche Rauigkeiten anzustreben sind, damit eine Füllungsoberfläche im klinischen Umfeld optimal funktioniert. Dazu gibt es unterschiedliche Bewertungsansätze.

Bezüglich der Plaqueakkumulation gibt es zwei Richtwerte die in der Literatur genannt werden. Weitman et al. (1975) und Shintani et al. (1985) untersuchten die Plaqueansammlung auf polierten Kompositoberflächen. Dabei wurden keine Unterschiede in der Plaqueanhäufung gefunden, wenn die R_a -Werte unter einem Bereich von 0,7 bis 1,44 μm lagen. Unter den Bedingungen der vorliegenden Studie wiesen alle Kompositoberflächen nach der Politur mit den 10 Bearbeitungsmethoden mit Ausnahme von Methode 2 (durchschnittlicher R_a -Wert von allen Kompositen betrug 1,757 μm) geringere R_a -Werte auf, als die geforderten 0,7- 1,44 μm . Ein anderer Richtwert, an dem sich viele Rauigkeitsstudien orientieren ist der von Quirynen et al. (1996) ermittelte. Im Gegensatz zu den zwei vorher genannten Untersuchungen wurde hier die Plaqueakkumulation auf Titan-Implantatoberflächen in vivo untersucht. Dabei wurde belegt, dass eine durchschnittliche Rauigkeit über 0,2 μm eine Zunahme der bakteriellen Retention begünstigt [Quirynen et al., 1996]. In Bezug auf diesen Richtwert wiesen ausschließlich die Prüfkörperoberflächen von Premise und Tetric Evo Ceram nach Politur mit Astropol geringere R_a -Werte als 0,2 μm auf.

Laut Willems et al. (1991) sollte die Politur der Füllungsoberfläche eine mindestens vergleichbare oder geringere Oberflächenrauigkeit als die antagonistische Schmelzoberfläche aufweisen, um unerwünschte Abrasionserscheinungen zu vermeiden. Um

dem gerecht zu werden, sollten R_a -Werte unter $0,64\text{ }\mu\text{m}$ angestrebt werden. Bis auf zwei Ausnahmen konnten alle Bearbeitungsmethoden auf allen untersuchten Kompositoberflächen dieses Kriterium erfüllen. Die Politur mit Sof-Lex Disks auf Herculite und Ceram X Duo Prüfkörpern sowie die Bearbeitungsmethode 2 wiesen höhere arithmetische Mittenrauwerte als $0,64\text{ }\mu\text{m}$ auf.

Chung (1994) berichtete, dass Restaurationen optisch glatt erscheinen wenn die Oberfläche R_a -Werte kleiner als $1\text{ }\mu\text{m}$ aufweist. Alle polierten Kompositoberflächen der vorliegenden Studie wiesen geringere R_a -Werte als $1\text{ }\mu\text{m}$ auf. Einzige Ausnahme ist die Methode 2 (durchschnittlicher R_a -Wert von allen Kompositen betrug $1,757\mu\text{m}$), bei der bereits mit bloßem Auge die Riefen auf den Prüfkörperoberflächen sichtbar waren.

Eine glatte Füllungs Oberfläche erhöht den oralen Komfort des Patienten. Die menschliche Zunge ist in der Lage Oberflächenrauigkeiten in einer Größenordnung von $0,3\text{ }\mu\text{m}$ zu spüren [Jones et al., 2004]. Astropol erreicht als einziges Poliersystem R_a -Werte unter $0,3\text{ }\mu\text{m}$ bei allen fünf Kompositen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass die Nanokomposite bezüglich der Polierbarkeit keine einheitliche Gruppe bilden. Die untersuchten Nanokompositen unterschieden sich mit einer Ausnahme bezüglich des arithmetischen Mittenrauwerkes statistisch signifikant. Filtek Supreme und Ceram X Duo zeigten keine statistisch signifikante Differenz und wiesen die größten R_a -Werte innerhalb der Nanokomposite auf. Bei Betrachtung der Profillängenverhältnisse hingegen zeigten die Nanokomposite untereinander ähnliche Ergebnisse. Lediglich Ceram X Duo wies signifikant größere LR-Werte auf.

Mit Hilfe der Nanotechnologie sollten Komposite entwickelt werden, welche durch bessere Poliereigenschaften als herkömmliche Mikrohybridkomposite gekennzeichnet sind. Diese Forderung konnte in der vorliegenden Studie nicht bei allen untersuchten Nanokompositen bestätigt werden. Bei Betrachtung des arithmetischen Mittenrauwerkes wiesen lediglich Premise und Tetric Evo Ceram eine signifikant bessere Oberflächenqualität als das Mikrohybridkomposite Herculite XRV auf ($p<0,001$). Die R_a -Werte von Filtek Supreme und Herculite XRV waren annähernd gleich. Die rauesten Oberflächen wurden auf den Ceram X Duo Prüfkörpern gemessen. Sowohl die R_a - als auch die LR-Werte waren höher als bei dem Referenzprodukt. In Bezug auf das Profillängenverhältnis zeigte neben Premise und Tetric Evo Ceram auch Filtek Supreme signifikant geringere Werte als das Mikrohybridkomposit Herculite XRV ($p<0,001$).

Im Hinblick auf die klinische Relevanz lässt sich aus der vorliegenden Studie ableiten, dass die Nanokomposite Premise, Tetric Evo Ceram und Filtek Supreme Vorteile in der Oberflächenpolitur gegenüber herkömmlichen Hybridkompositen aufweisen und für die Praxis empfohlen werden können. Weitere Studien müssen zeigen, ob die Nanokomposite mit ihren mechanischen Eigenschaften den klinischen Anforderungen im Front- und Seitenzahnbereich gerecht werden und als Universalkomposit in der zahnärztlichen Praxis eingesetzt werden können.

Nach den vorliegenden profilometrischen und rasterelektronenmikroskopischen Ergebnissen kann als Vorbehandlung für eine optimale Politur von Nanokompositen eine Kombination aus Diamant- und Hartmetallfinierern (AV3) empfohlen werden. Denn auf allen untersuchten Kompositoberflächen erzielte bei allen drei Poliersystemen die Vorbehandlung mit dem Ausarbeitungsverfahren 3 (DF30/HMF) die geringsten R_a - und LR-Werte.

Das dreistufige Poliersystem Astropol wies auf allen untersuchten Kompositprüfkörpern die glattesten Oberflächen bezüglich des Profillängenverhältnisses und des arithmetischen Mittenrauwertes und kann daher besonders empfohlen werden. OptiShine eignet sich nur nach einer ausreichenden Vorbehandlung mit einem Diamant- und Hartmetallfinierer (AV3) als Poliermethode. Die alleinige Vorbehandlung durch einen 30 μm Diamantfinierer (AV1) führte zu einem unzureichenden Politurergebnis. Im Hinblick auf die Effektivität von einstufigen und mehrstufigen Polierverfahren kann aus den Ergebnissen dieser Studie abgeleitet werden, dass die untersuchten mehrstufigen Verfahren, mit Ausnahme der Referenzmethode, glattere Oberflächen erzielen und somit den einstufigen Systemen vorzuziehen sind.

Die Referenzmethode (Sof-Lex Disks) gilt als klinischer Standard, da sie sich über längere Zeiträume sehr gut bewährt hat, was zahlreiche Studien bestätigen [Wilson et al, 1990; Tate et al. 1996; Turssi et al., 2000; Jung et al., 2003]. Dies konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Die Sof-Lex Disks erzielten bei allen fünf Kompositen die signifikant höchsten Rauigkeitswerte ($p < 0,001$).

5.5 Schlussfolgerungen

Die Oberflächenrauigkeit von Nano- und Hybridkompositen wurde signifikant durch die Materialien ($p < 0,001$), die Ausarbeitungsverfahren ($p < 0,001$) und die Poliermethoden ($p < 0,001$) beeinflusst. Zudem waren signifikante Wechselwirkungen zwischen den Ausarbeitungsverfahren und den Poliermethoden nachweisbar ($p < 0,001$).

Die vier untersuchten Nanokomposite zeigten deutliche Unterschiede bezüglich der gemessenen Oberflächenrauigkeit. Auf den Oberflächen von Premise wurden die geringsten Rauigkeitswerte nach jedem Poliervorgang ermittelt.

Die Nanokomposite Premise und Tetric Evo Ceram wiesen signifikant geringere R_a -Werte auf, als Herculite XRV, Ceram X Duo und Filtek Supreme ($p < 0,001$) und signifikant geringere LR-Werte als Herculite XRV und Ceram X Duo.

Bei dem einstufigen Poliersystem OptiShine hatten die verschiedenen Ausarbeitungsverfahren einen signifikanten Einfluss auf die endgültige Oberflächenrauigkeit. Im Gegensatz dazu spielte bei den zwei- und dreistufigen Systemen Enhance/PoGo und Astropol die Art der Vorbehandlung eine untergeordnete Rolle.

Auf allen untersuchten Kompositoberflächen erzielte das dreistufige Poliersystem Astropol die geringsten R_a - und LR-Werte. Das zweistufige Enhance/PoGo System und der Einschrümpfpolierer OptiShine waren weniger effizient, wobei OptiShine die höchsten Rauigkeitswerte aufwies. Das Ausarbeitungsverfahren 1 (30 μm DF) und die anschließende Politur mit OptiShine lieferte ungenügende Ergebnisse.

Die Referenzmethode Sof-Lex Disks erzielte die höchsten Rauigkeitswerte auf allen untersuchten Kompositoberflächen.

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden in vitro Studie war es, die Oberflächenqualität von vier Nanokompositen und einem traditionellem Hybridkomposit nach unterschiedlicher Ausarbeitung und Politur zu bewerten. Dabei sollte die Eignung von drei unterschiedlichen Poliersystemen in Kombination mit verschiedenen Ausarbeitungsverfahren untersucht werden.

Zu den untersuchten Kompositen zählten die Nanohybridkomposite Premise (Kerr Hawe), Tetric Evo Ceram (Ivoclar Vivadent), Ceram X Duo (Dentsply DeTrey) sowie das Nanofüllerkomposit Filtek Supreme (3M ESPE). Als Referenzprodukt diente das Mikrohybridkomposit Herculite XRV (Kerr Hawe). Von jedem Komposit wurden 60 plane Prüfkörper mit einer Grundfläche von 7 mm x 7 mm und einer Höhe von 4mm hergestellt. Insgesamt ergab sich somit ein Probenumfang von $n = 300$ Prüfkörpern. Mit Hilfe einer Sandpapierscheibe der Körnung 600 grit wurde eine standardisierte Oberfläche geschaffen. Von den 60 hergestellten Prüfkörpern pro Komposit wurden jeweils 15 Proben mit einem von drei unterschiedlichen Ausarbeitungsverfahren bearbeitet. Zur Anwendung kamen ein 30 μm Diamantfinierer (AV1), die Kombination aus einem 30 μm und einem 20 μm Diamantfinierer (AV2), sowie eine Abfolge aus einem 30 μm Diamant- und einem Hartmetallfinierer (AV3). Die übrigen 15 Prüfkörper wurden mit dreistufigen Sof-Lex Disks (mittlere, feine, sehr feine Körnung) bearbeitet. Da dieses Poliersystem als akzeptierter klinischer Standard gilt, sollte es als Referenz zum Vergleich mit den übrigen Poliermethoden dienen. Des Weiteren wurden die 15 Prüfkörper der jeweiligen Ausarbeitungsverfahren in drei Untergruppen mit $n = 5$ Prüfkörpern unterteilt. Die Proben der ersten Untergruppe wurden mit dem dreistufigen Astropol-Poliersystem (Ivoclar Vivadent), die der zweiten Untergruppe mit dem Einschrittsystem Opti Shine (KerrHaWe) und die der dritten Untergruppe mit dem zweistufigen Poliersystem Enhance/PoGo (Dentsply) poliert. Daraus ergaben sich 10 Untersuchungsgruppen pro Komposit.

Die quantitative Messung der Oberflächenrauigkeit der Prüfkörper erfolgte profilometrisch mittels eines laseroptischen Mikrotasters. Die Abtastung der Oberfläche erfolgte als Parallelaufzeichnung in neun Tastschnitten mit einer Taststreckenlänge von 1,75 mm sowie einem Abstand von jeweils 0,219 mm zwischen zwei Tastschnitten. Die Länge der Messstrecke betrug jeweils 1,25 mm. Zur Charakterisierung der Oberflächenrauigkeit

wurden die Rauigkeitsparameter arithmetischer Mittenrauwert (R_a) sowie das Profillängenverhältnis (LR) herangezogen.

Die prüfstatistische Auswertung der quantitativ erhobenen Daten erfolgte durch eine zweifache Varianzanalyse und dem Anslusstest nach Scheffé.

Zur qualitativen Untersuchung der Kompositoberflächen wurden jeweils zwei zufällig ausgewählte Prüfkörper aus jeder der 50 Gruppen im Rasterelektronenmikroskop beurteilt. Die Betrachtung erfolgte bei 80-facher Monitorvergrößerung. Die Oberflächenqualität wurde gemäß folgender Kriterien beurteilt:

- Merkmal 1: glatt/homogen
- Merkmal 2: mittlere Rauigkeiten
- Merkmal 3: starke Rauigkeiten
- Merkmal 4: Oberflächendestruktionen

Die prüfstatistische Auswertung der profilometrischen Messdaten zeigte, dass die Oberflächenrauigkeit signifikant durch die Kompositmaterialien ($p < 0,001$), die Ausarbeitungsverfahren ($p < 0,001$) und die Poliermethoden ($p < 0,001$) beeinflusst wurde. Zudem waren signifikante Wechselwirkungen zwischen den Ausarbeitungsverfahren und den Poliermethoden nachweisbar ($p < 0,001$). Die drei Ausarbeitungsverfahren wirkten sich also unterschiedlich auf die Politurergebnisse aus.

Bei vergleichender Betrachtung der Gesamtmittelwerte jedes einzelnen Komposites nach Anwendung der vier Poliersysteme ergab sich sowohl in Bezug auf R_a und LR die gleiche Rangfolge. Die Nanokomposite Premise und Tetric Evo Ceram wiesen signifikant geringere R_a -Werte auf als Herculite XRV, Ceram X Duo und Filtek Supreme ($p < 0,05$) und signifikant geringere LR-Werte als Herculite XRV und Ceram X Duo ($p < 0,001$). Das Nanofüllerkomposit Filtek Supreme zeigte bezüglich des arithmetischen Mittenrauwerkes keine geringere Oberflächenrauigkeit als das traditionelle Mikrohybridkomposit Herculite XRV. Die größten gemittelten R_a -Werte wurden auf den Prüfkörperoberflächen von Ceram X Duo gemessen, aber die Unterschiede zu Filtek Supreme und Herculite XRV waren nur gering und hatten keine statistische Signifikanz.

Bei allen drei Poliersystemen wirkt sich die Vorbehandlung mit dem Ausarbeitungsverfahren 3 (AV3- DF30/HMF) günstig auf das endgültige Polierresultat aus. Bei dem einstufigen Poliersystem OptiShine hatten die verschiedenen Ausarbeitungsverfahren einen signifikanten Einfluss auf die endgültige Oberflächenrauigkeit ($p < 0,001$). Im Gegensatz dazu spielte bei den zwei- und dreistufigen Systemen Enhance/PoGo und Astropol die Art der Vorbehandlung eine untergeordnete Rolle.

Bei Betrachtung der profilometrischen Ergebnisse wird deutlich, dass die Oberflächenrauigkeit der Kompositprüfkörper umso geringer war, je mehr Polierschritte das jeweilige System hatte. Auf allen untersuchten Kompositoberflächen erzielte das dreistufige Poliersystem Astropol die geringsten R_a - und LR-Werte. Das zweistufige Enhance/PoGo System und der Einschruttpolierer OptiShine waren weniger effizient, wobei OptiShine die höchsten Rauigkeitswerte aufwies. Das Ausarbeitungsverfahren 1 (30µm DF) und die anschließende Politur mit OptiShine lieferten ungenügende Ergebnisse.

Die drei untersuchten Poliersysteme waren, mit Ausnahme der Bearbeitungsmethode 2 (DF30/OS), der Referenzmethode deutlich überlegen. Die Sof-Lex Disks erzielten signifikant die größten R_a - und LR-Werte auf allen untersuchten Kompositoberflächen ($p < 0,001$).

Die rasterelektronenmikroskopischen Befunde standen weitestgehend im Einklang mit den profilometrischen Ergebnissen. So konnten nach Politur mit Astropol im Vergleich zu den anderen Poliersystemen bei allen fünf Kompositen am häufigsten glatte homogene Areale (Merkmal 1: durchschnittliche 30,1%) beobachtet werden. Dahingegen ließ OptiShine hauptsächlich gering raue (Merkmal 2: durchschnittlich 52,5%) und sehr raue Anteile (Merkmal 3: durchschnittlich 41,6%) auf den Probenoberflächen zurück.

Summary

The purpose of the study was to evaluate the surface quality of four nanoparticle composites and one hybrid composite after polishing with three different techniques.

The nanocomposites Premise (KerrHaWe), Tetric Evo Ceram (Ivoclar Vivadent), Filtek Supreme (3M ESPE) and Ceram X Duo (Dentsply) and the hybrid composite Herculite XRV (KerrHaWe) were selected. 60 specimens sized 7 x 7 mm were made of each material. After light curing, the specimens were treated with sandpaper discs of 600 grit. 15 specimens of each composite were polished using flexible Sof-Lex discs (3M Espe). The remaining 45 specimens of each material were prepared with three finishing protocols: a single 30 µm diamond (n = 15), a sequence of a 30 µm and a 20 µm diamond (n = 15) and a 30 µm diamond followed by a tungsten carbide finishing bur (n = 15). Each series of 15 specimens were then subdivided into three groups of five and polished with the Astropol system (Ivoclar Vivadent), OptiShine brushes (KerrHaWe) and the Enhance / PoGo system (Dentsply).

Quantitative evaluation of surface roughness was done with the help of optical laser stylus profilometry. Each surface was scanned automatically by nine parallel tracings. Surfaces were characterized with respect to average roughness (R_a) and profile-length-ratio (LR). Statistical analysis of the data was performed by two-way Anova and post-hoc tests by Scheffé.

Qualitative evaluation of the surfaces was done with the help of scanning electron microscopy (PSEM 500, Philipps). Photomicrographs were assessed with respect to surface quality in four gradings:

- grade 1: smooth, homogenous surface
- grade 2: minor roughness
- grade 3: severe roughness
- grade 4: destructions

Surface roughness after polishing was significantly affected by the composite materials ($p < 0,001$), by the finishing methods ($p < 0,001$) and by the polishing techniques ($p < 0,001$). There was significant interaction between finishing and polishing ($p < 0,001$).

The nanocomposites Premise and Tetric Evo Ceram were significantly smoother compared to Herculite XRV, Ceram X Duo and Filtek Supreme ($p < 0,05$) with respect to R_a and also significantly smoother than Herculite XRV und Ceram X Duo ($p < 0,001$) with respect to LR. Filtek Supreme had a surface quality similar to that of the hybrid composite Herculite XRV with respect to R_a . The greatest R_a -values were measured on Ceram X Duo specimens, but the differences to Filtek Supreme and Herculite XRV were only small and of no significance.

In case of the one-step polishing system OptiShine, the different finishing pre-treatments had a strong influence on the resulting surface roughness ($p < 0,001$). On the contrary the finishing method was only of moderate influence on the resulting surface roughness in the case of Enhance/Pogo and Astropol.

The greatest degree of roughness for all composites was caused by OptiShine brushes after finishing with a single 30 μm diamond. The Astropol multi-step system achieved the lowest average roughness on all composites.

Except for a combination of a 30 μm diamond and OptiShine brushes, which caused severe roughness, all the polishing methods produced surfaces which were significantly smoother than was the case with Sof-Lex discs ($p < 0,001$ for R_a and LR).

Qualitative assessment of the SEM photomicrographs accorded well with the quantitative results. Astropol polishers had the greatest smoothing effect and achieved the largest number of smooth and homogeneous surfaces (grade1), ranging from 20-50 %. The highest level of roughness for all composites was observed after application of OptiShine brushes. The OptiShine polishers generally yielded surfaces with minor roughness (grade 2) between 48-57% and surfaces with severe roughness (grade 3) ranging from 39-47 %.

To sum it up it can be said that nanocomposites did not constitute a homogeneous group regarding surface roughness after polishing. Two of the nanocomposites were significantly smoother, while the other two nanocomposites had a surface quality similar to that of a hybrid composite. In all cases, a three-step polishing system was more efficient than a two-step or a one-step procedure on all composites.

7 Literaturverzeichnis

Barghi, N.:

Surface polishing of new composite resins.

Compend Contin Educ Dent 22 (11) (2001), 918-924.

Barghi, N., Lind, S.D.:

A guide to polishing direct composite resin restorations.

Compend Contin Educ Dent 21(2) (2000), 139-142.

Baseren, M.:

Surface roughness of nanofill and nanohybrid composite resin and ormocer-based tooth-colored restorative materials after several finishing and polishing procedures.

J Biomater Appl 19 (2004), 121-134.

Baumstieger, A:

Effektivität unterschiedlicher Poliersysteme für Hybridkomposite unter praxisähnlichen Bedingungen.

Medizinische Dissertation, Gießen 2005.

Berastegui, E., Canalda, C., Brau, E., Miquel, C.

Surface roughness of finished composite resins.

J Prosthet Dent 68 (1992), 742-749.

Bollen, C.M.L., P. Lambrechts, M. Quirynen:

Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: A view of the literature.

Dent Mater 13 (1997), 258-269

Carlen, A., Nikdel, K., Wennerberg, A., Holmerg, K., Olsson, J.:

Surface characteristics and in vitro biofilm formation on glass ionomer and composite resin.

J Biomater Appl 22 (2001), 481-487.

Chan, K.C., Fuller, J.L., Hormati, A.A.:

The ability of foods to stain two composite resins.

J Prosthet Dent 43 (1980), 542-545.

Choi, M.-S., Lee, Y.-K., Lim, B.-S., Rhee, S.-H., Yang, H.-C. :

Changes in surface characteristics of dental resin composites after polishing.

J Mater Science: Mater Medic 16 (2005), 347-353.

Chung, K.:

Effects of finishing and polishing procedures on the surface texture of resin composites.

Dent Mater 10 (1994), 325-330.

Davis, N.:

A nanotechnology composite.

Compend Contin Educ Dent 24 (9) (2003), 665-670.

DIN-Normen:

DIN 4762 Oberflächenrauigkeit Begriffe Oberfläche und ihre Kenngrößen Identisch mit ISO 4287/1: 1984.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Ed): DIN Taschenbuch 106 Verzahnungs-terminologie Normen (Antriebstechnik 1);

Beuth Verlag GmbH: Berlin, Wien, Zürich (1996), 334-349.

DIN-Normen:

DIN 4768 Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten Begriffe Messbedingung.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (Ed.): DIN Taschenbuch 1 Mechanische Technik Grundnormen;

Beuth Verlag GmbH: Berlin, Wien, Zürich (1995), 295-297.

DIN-Normen:

DIN 4777 Oberflächenmesstechnik Profilfilter zur Anwendung in elektrischen Tastschnittgeräten Phasenkorrekte Filter.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Ed.): DIN Taschenbuch 1 Mechanische Technik
Grundnormen;

Beuth Verlag GmbH: Berlin, Wien, Zürich (1995), 301-304.

Dodge, W.W., Dale, R.A., Cooley, R.L., Duke, E.S.:

Comparison of wet and dry finishing of resin composites with aluminum oxide discs.

Dent Mater 7 (1) (1991), 18-20.

Duke, E. S.:

Has dentistry moved into the nanotechnology era?

Compend Contin Educ Dent 24 (5) (2003), 380-382.

Duschner, H.:

Die dreidimensionale Darstellung mikroskopischer Strukturen mit CLSM.

Zahnärztliche Mitteilungen 10 (2001), 17-24.

Eide, R.T., A.B.:

Finishing and polishing of composites.

Acta Odontol Scand 46 (1988), 307-312.

Ergucu, Z., Turkun, L.S.:

Surface roughness of novel resin composites polished with one-step systems.

Oper Dent 32(2) (2007), 185-192.

Ernst, C.-P., Willershausen, B.:

Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite.

Zahnärztliche Mitteilungen 7 (2003), 30-40.

Feinprüf GmbH:

Betriebsanleitung Perthometer S8P.

Göttingen (1989).

Feinprüf GmbH:

Betriebsanleitung Optischer Mikrotaster Focodyn

Göttingen (1989).

Feinprüf Perthen GmbH:

Betriebsanleitung Option Parallelaufzeichnung

Göttingen (1990).

Fogleman, E.A., Kelly, M.T., Grubbs, W.T.:

Laser interferometric method for measuring linear polymerization shrinkage in light cured dental restoratives.

Dental Materials 18 (2002), 324-330.

Fruits, T.J., Miranda, F.J., Coury, T.L.:

Effects of equivalent abrasive grit sizes utilizing differing polishing motions selected restorative materials.

Quintessence International 27(4) (1996), 279-285.

Gedik, R., Hürmüzlü, F., Coskun, A., Bektas, Ö., Özdemir, A.:

Surface roughness of new microhybrid resin-based composites.

JADA 136 (2005), 1106-1112.

Goldstein, G.R., Wankine, S.:

Surface roughness evaluation of composite resin polishing techniques.

Quintessence International 20 (1989), 199-204.

Graf, K., Müller, F.X., Rammelsberg, P.:

In vitro Untersuchung zu Drei-Medien-Abraion von Zahnhartsubstanz und dentalen Keramiken.

Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 57(10) (2002), 599-601.

Gross, M.D., Moser, J.B.:

A colometric study of coffee and tea staining of four composite resins.

J Oral Rehabil 4 (1977), 311-322.

Heintze, S.D., Forjanic, M., Rousson, V.:

Surface roughness and gloss of dental materials as a function of force and polishing time in vitro.

Dent Mater 22 (2006), 146-165.

Hellwig, E., Klimek, J., Attin, T.:

Restaurationen mit plastischen Füllungsmaterialien.

In: Einführung in die Zahnerhaltung.

Urban und Fischer: München Jena (2003), 145-158.

Herrgott, A.-M.L., Ziemiecki, T.L., Dennison, J.B.:

An evaluation of different composite resin systems finished with various abrasives.

J Am Dent Assoc 119 (1989), 729-732.

Hickel, R.:

Moderne Füllungswerkstoffe.

DZZ 52 (1997), 572-585.

Hondrum, S.O., Fernandez, R.:

Contouring, finishing, and polishing class 5 restorative materials.

Oper Dent 22 (1997), 30-36.

Ilie, N., Kunzelmann, K.-H., Kickerl, R.:

Werkstoffkundliche Untersuchungen zu Kompositen.

Dtsch Zahnärztl Z 60 (2005), 321-334.

Jefferies, S.:

The art and science of abrasive finishing and polishing in restorative dentistry.

Dent Clin North Am 42(4) (1998), 613-627.

Jones, C.S., Billington, R.W., Pearson, G.J.:

The in vivo perception of roughness of restorations.

Br Dent J 196 (2004), 42.45.

Jones, C.S., Billington, R.W., Pearson, G.J.:

Interoperator variability during polishing.

Quintessence Int 37 (2006), 183-190.

Joniot, S. B., Gregoire, G. L., Auther, A.M., Roques, Y. M.:

Three-dimensional optical profilometry analysis of surface states obtained after finishing sequences for three composite resins.

Oper Dent 25 (2000), 311-315.

Joniot, S., Salomon, J.P., Dejou, J., Gregoire, G.:

Use of two surface analyzers to evaluate the surface roughness of four esthetic materials after polishing.

Oper Dent 31 (1) (2006), 39-46.

Jung, M.:

Der Einfluss unterschiedlicher Finierer auf Kompositoberflächen.

Dtsch Zahnärztl Z 49 (1994), 884-888.

Jung, M.:

Surface roughness and cutting efficiency of composite finishing instruments.

Oper Dent 22 (1997), 98-104.

Jung, M.:

Ausarbeitung und Politur von laborgefertigten Keramik- und Kompositinlays in-vitro und in-vivo.

Habilitationsschrift, Giessen (1998).

Jung, M.:

Finishing and polishing of a hybrid composite and a heat-pressed glass ceramic.

Oper Dent 27 (2002), 175-183.

Jung, M., Baumstieger, M., Klimek, J.:

Effectiveness of diamond-impregnated felt wheels for polishing a hybrid composite.

Clin Oral Invest 1 (1997), 71-76.

Jung, M., Bruegger, H., Klimek, J.:

Surface geometry of three packable and one hybrid composite after polishing.

Oper Dent 28-6 (2003), 816-824.

Jung, M., Hornung, K., Klimek, J.:

Polishing occlusal surfaces of direkt class II composite restorations in vivo.

Oper Dent 30-2 (2005), 139-146.

Jung, M., Otte, A., Klimek, J.:

Is surface roughness of resin composites affected by operator`s performance?

Am J Dent 21 (1) (2008), 3-6.

Jung, M., Voit, S., Klimek, J.:

Surface geometry of three packable and one hybrid composite after finishing.

Oper Dent 28 (2003), 53-59.

Jung, T., Borchers, L.:

Schleif- und Poliermittel.

In: K. Eichner, H.-F. Kappert, (Hrsg.): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung.

Bd 1. Grundlagen und ihre Verarbeitung;

Thieme Verlag: Stuttgart, 2000, 373-384.

Kaplan, B., Goldstein, G., Vijayaraghavon, T., Nelson, I.:

The effect of three polishing systems on the surface roughness of four hybrid composites: a profilometric and scanning electron microscopy study.

J Prosthet Dent 76 (1996), 34-38.

Kawai, K., Urano, M.:

Adherence of plaque components to different restorative materials.

Oper Dent 26 (2001), 396-400.

Korkmaz, Y., Ozel, E., Attar, N.:

The influence of one-step polishing systems on the surface roughness and microhardness of nanocomposites.

Oper Dent 33(1) (2008), 44-50.

Krejci, I., Albertoni, M., Lutz, F.:

In vitro Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssyme. 2. Zahnbürsten-/Zahnpastaabrasion und chemischen Degradation.

Schweiz Monatsschr Zahnmed 100 (10) (1990), 1164-1168.

Krejci, I., Lutz, F.:

Kompositfüllungen-das 1x1 des Ausarbeitens.

Schweiz Monatsschr Zahnmed 94 (1984), 1016.

Krejci, I., Lutz, F., Boretti, R.:

Resin composite polishing-filling the gaps:

Quintessence Int 30 (7) (1999), 490-500.

Lambrechts, P.M., Braem, V.G.:

Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives.

OperDent 12 (1987), 53-78.

Lendenmann, U.:

Wissenschaftliche Dokumentation Tetric Evo Ceram.

Ivoclar Vivadent AG Forschung & Entwicklung (2005).

Lu, H., Roeder, L.B., Lei, L., Powers, J.M.:

Effect of surface roughness on stain resistance of dental resin composite.

J Esthet Restor Dent 17 (2005), 102-109.

Lu, H., Roeder, L.B., Powers, J.M.:

Effect of polishing systems on the surface roughness of microhybrid composites.

J Esthet Restor Dent 15 (2003), 297-304.

Lutz, F., Phillips, R.W., Roulet, J.F., Imfeld, T.:

Komposits-Klassifikation und Wertung.

Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 93 (1983), 914-927.

Manhart, J.:

Ästhetische Restauration im Seitenzahnbereich mit plastischen Kompositfüllungen.

Dental Spiegel 23 (2003), 22-26.

Manhart, J., Kunzelmann, K.-H., Chen, H.Y., Hickel, R.:

Mechanical properties and wear behavior of light-cured packable composite resins.

Dent Mater 16 (2000), 33-40.

Mandikos, M.N., Mc Gibney, G.P., Davis, E., Bush, P.J., Carter, J.M.:

A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins.

J Prosthet Dent 85(4) (2001), 386-395.

Marigo, L., Rizzi, M., La Torre, G., Rumi, G.:

3-D surface profile analysis: different finishing methods for resin composites.

Oper Dent 26 (2001), 562-568.

Mitra, S., B., Wu, D., Holmes, B. N.:

An application of nanotechnology in advanced dental materials.

J Am Dent Assoc 134 (10) (2003), 1382-1390.

Morgan, M.: Finishing and polishing of direct posterior resin restorations.

Pract Proced Aesthet Dent 16(3) (2004), 211-217.

O'Brien, W.J.:

Double layer effect and other optical phenomena related to esthetics.

Dent Clin North Am 29 (1985), 667-672.

Paravina, R. D., Roeder, L., Lu, H., Vogel, K., Powers, J. M.:

Effect of finishing and polishing procedures on surface roughness, gloss and color of resin – based composites.

Am J Dent 17 (2004), 262-266.

Patel, S.B, Gordan, V.V., Barret, A.A., Sheen, C.:

The effect of surface finishing and storage solution on the color stability of resin-based composites.

JADA 135 (2004), 587-593.

Pelka, M., N. Krämer, K.-H. Kunzelmann:

Oberflächenveränderungen verschiedener Modellmaterialien durch mechanische Profilometrie.

Dtsch Zahnärztl Z 48 (1993), 488-491.

Pelka, M., Frankenberger, R., Petschelt, A.:

Verschleißsimulation von Materialien für die Rekonstruktion okklusaler Kontaktbereiche.

Zahnärztl Welt 107 (11) (1998), 666-671.

Pratten, D.H., Johnson, G.H.:

An evaluation of finishing instruments for an anterior and a posterior composite.

J Prosthet Dent 60 (1988), 154-158.

Pschyrembel:

Klinisches Wörterbuch.

Walter de Gruyter Verlag: Berlin New York (1998), 412.

Quirynen, M., C.M. Bollen, W. Papaioannou, J. Van Eldere, D. van Steenberghe:

The influence of titanium abutment surface roughness on plaque accumulation and gingivitis: short term observations.

Int J Oral Maxillofac Implants 11 (1996), 169-178

Ratanapridakul, K., Leinfelder, K.F., Thomas, J. :

Effect of finishing on the in vivo wear rate of a posterior composite resin.

J Am Dent Assoc 118 (1989), 333-335.

Reis, A.F., Giannini, M., Lovadino, J.R.:

The effect of six polishing systems on the surface roughness of two packable resin-based composites.

Am J Dent 15 (3) (2002), 193-197.

Reis, A.F., Giannini, M., Lovadino, J.R., Ambrosano, G.M.:

Effects of various finishing systems on the surface roughness and staining susceptibility of packable composite resins.

Den Mater 19 (2003), 12-18.

Roeder, L. B., Tate, W. H., Powers, J. M.:

Effect of finishing and polishing procedures on the surface roughness of packable composites.

Oper Dent 25 (2000), 534-543.

Rzanny, A., Dörnbrack, M., Welker, D., Fachet, M.:

Optimierung der Oberflächenqualität von Kompositen unterschiedlicher Indikation.

Dtsch Zahnärztl Z 58 (2003), 533-537.

Rzanny, A., Welker, D.:

Bearbeitung moderner Verblend- und Füllungskomposite.

Temwork Interdisziplin. J. Prothet. Zahnheilkunde 3 (2) (2000), 203-212.

Schmidlin, P.R., Sener, B., Lutz, F.:

Cleaning and polishing efficacy of abrasive-bristle brushes and a prophylaxis paste on resin composite material in vitro.

Quintessence Int 33 (2002), 691-699.

Sato, T., Miyazaki, M., Rikuta, A. :

Real-time dimensional change in light-cured composites at various depths using laser speckle contrast analysis.

Eur J Oral Sci 112 (2004), 538-544.

Sectos, J., Tarim, B., Suzuki, S.:

Surface finish produced on resin composites by new polishing systems.

Quintessence Int 30(3) (1999), 169-173.

Sen, D., Göller, G., Issever, H.:

The effect of two polishing pastes on the surface roughness of bis-acryl composite and methacrylate-based resins.

J Prostet Dent 88 (2002), 527-532.

Senawongse, P., Pongprueksa, P.:

Surface roughness of nanofill and nanohybrid resin composites after polishing and brushing.

J Esthet Restor Dent 19 (5) (2007), 265-273.

Shintani, H., Satou, J., Satou, N., Hayashihara, H.:

Effects of various finishing methods on staining and accumulation of streptococcus mutans HS-6 on composite resins.

Dent Mater 1 (1985), 225-227.

Silikas, N., Kavvadia, K., Eliades, G., Watts, D.:

Surface characterization of modern resin composites: a multitechnique approach.

Am J Dent 18 (2005), 95-100.

Sölderholm, K-J, Richard, N.D.:

Wear resistance of composites: a solved problem?

Gen Dent 46 (1998), 256-263.

St-Georges, A.J., Bolla, M., Fortin, D., Muller-Bola, M., Thompson, J.Y., Stamatiades, P.J.:

Surface finish produced on three resin composites by new polishing systems.

Operative Dentistry 30-5 (2005), 593-597.

Szep, S., Baum, C., Alamouti, C.:

Removal of amalgam, glass-ionomer cement and compomer restorations: changes in cavity dimensions and duration of the procedure.

OperDent 27 (6) (2002), 613-620.

Tate, W.H., Powers, J.M.:

Surface roughness of composites and hybrid ionomers.

OperDent 21 (1996), 53-58.

Tjan, H.L., Chan, C.A.:

The polishability of posterior composites.

J Prostetic Dent 61 (1989), 138-146.

Terry, D.A.:

Applications of nanotechnology.

Pract Proced Aesthet Dent 16 (3) (2004), 220-222.

Türkün, L.-S., Türkün, M.:

The effect of one-step polishing system on the surface roughness of three esthetic resin composite materials.

Oper Dent 29-2 (2004), 203-211.

Türkün, L.-S., Leblebicioglu, E.A.:

Stain retention and surface characteristics of posterior composites polished by one-step systems.

Am J Dent 19 (6) (2006), 343-347.

Turssi, C.P., Ferracane, J.L., Serra, M.C.:

Abrasive wear of resin composites as related to finishing and polishing procedures.

Dental Materials 21 (2005), 641-648.

Turssi, C.P., Saad, J.R., Duarte S.L., Rodrigues, A.L.:

Composite surfaces after finishing and polishing techniques.

Am J Dent 13 (3) (2000), 136-138.

Voit, Stefan:

Die rotierende Bearbeitung von drei modernen Seitenzahnkompositen und eines Hybridkompositen.

Medizinische Dissertation, Giessen 2004.

Ward, D. H.:

Esthetic restoration of tooth structure using a nanofill composite system.

Compend Contin Educ Dent 26 (4) (2005), 252-257.

Wardak, D., Wirz, J., Schmidli, F.:

Der Einfluss verschiedener Poliersysteme auf zahnärztliche Verblendmaterialien.

Schweiz Mschr Zahnmed 111(3) (2001), 282-291.

Wassell, R.W., McCabe, J.F.:

Wear characteristics in a two-body wear test.

Dental Materials 10(4) (1994), 269-274

Watanabe, T., Masashi, M., Moore, B.K.:

Influence of polishing instruments on the surface texture of resin composites.

Quintessence Int 37 (1) (2006), 61-67.

Watanabe, T., Masashi, M., Takamizawa, T., Kurokawa, H., Rikuta, A., Ando, S.:

Influence of polishing duration on surface roughness of resin composites.

Journal of Oral Science 47(1) (2005), 212-25.

Weitman, R.T., Eames, W.B.:

Plaque accumulation on composite surfaces after various finishing procedures.

J Am Dent Assoc 91 (1975), 101-106.

Willems, G., Lambrechts, P., Braem, M., Vuylsteke-Wauters, M., Vanherle, G.:

The surface Roughness of Enamel- to- Enamel Contact Areas compares with the Intrinsic Roughness of Dental resin Composites.

J Dent Res 10 (1991), 1299-1305.

Williams, P.T., Johnson, L.N.:

Composite resin restoratives revisited.

J Can Dent Assoc 59 (1993), 538-543.

Wilson, F., Heath, J.R., Watts, D.C.:

Finishing composite restorative materials.

Journal of Oral Rehabilitation 17 (1) (1990), 79-87.

Yalcin, F., Korkmaz, Y., Baseren, M.:

The effect of two differnt polishing techniques on microleakage of new composites in class V restoration.

J Contemp Dent Pract 7(5) (2006), 18-25.

Yap, A., Lye, K.W., Sau, C.W.:

Surface characteristics of tooth-colored restoratives polished utilizing different poling systems.

Oper Dent 22 (1997), 260-265.

Yap, A.U.J., Tan, C.H., Chung, S.M.:

Wear behaviour of new composite restoratives.

Oper Dent 29-3 (2004a), 269-274.

Yap, A.U.J., Yap, S.H., Teo, C.K., Ng, J.J.:

Comparison of surface finish of new aesthetic restorative materials.

Oper Dent 29-1 (2004b), 100-104.

Yap, A.U.J., Yap, S.H., Teo, C.K., Ng, J.J.:

Finishing/ polishing of composite and compomer restoratives: effectiveness of one-step systems.

Oper Dent 29-3 (2004), 275-279.

Yap, A., Tan, A., Quan, C.:

Non-destructive characterization of resin-based filling materials using Electronic Speckle Pattern Interferometry.

Dental Materials 20 (2004), 377-382.

8 Anhang

Das folgende Kapitel zeigt eine tabellarische Darstellung der profilometrischen Messergebnisse. Zunächst werden die verwendeten Abkürzungen erläutert.

R_a = arithmetischer Mittenrauwert

LR = Profillängenverhältnis

Methode 1 = DF 30/ Astropol

Methode 2 = DF 30/ Opti Shine

Methode 3 = DF 30/ Enhance/PoGo

Methode 4 = DF 30/ DF 20/ Astropol

Methode 5 = DF 30/ 20/ Opti Shine

Methode 6 = DF 30 / 20/ Enhance/PoGo

Methode 7 = DF 30/ HMF/ Astropol

Methode 8 = DF 30/ HMF/ Opti Shine

Methode 9 = DF 30/ HMF/ Enhance/ PoGo

Methode 10 = Sof-Lex Disks

DF 30 = 30µm Diamantfinierer

DF 20 = 20 µm Diamantfinierer

HMF = Hartmetallfinierer

8.1 Tabellarische Darstellung der profilometrischen Messergebnisse

Tabelle 8: Ergebnisse der profilometrischen Untersuchung

| Methoden | | Herculite XRV | | Premise | | Filtek Supreme | | Ceram X Duo | | Tetric Evo Ceram | |
|----------|------------|---------------|-------|---------|-------|----------------|-------|-------------|-------|------------------|-------|
| | | Ra (µm) | LR | Ra (µm) | LR | Ra (µm) | LR | Ra (µm) | LR | Ra (µm) | LR |
| 1 | 1. | 0,230 | 1,038 | 0,110 | 1,014 | 0,340 | 1,040 | 0,110 | 1,015 | 0,260 | 1,085 |
| | 2. | 0,160 | 1,039 | 0,100 | 1,016 | 0,150 | 1,030 | 0,130 | 1,018 | 0,200 | 1,039 |
| | 3. | 0,170 | 1,038 | 0,120 | 1,017 | 0,390 | 1,053 | 0,230 | 1,065 | 0,110 | 1,019 |
| | 4. | 0,190 | 1,047 | 0,120 | 1,019 | 0,300 | 1,090 | 0,160 | 1,030 | 0,130 | 1,026 |
| | 5. | 0,200 | 1,052 | 0,090 | 1,011 | 0,560 | 1,057 | 0,300 | 1,081 | 0,150 | 1,022 |
| | Mittelwert | 0,190 | 1,043 | 0,108 | 1,015 | 0,348 | 1,054 | 0,186 | 1,042 | 0,170 | 1,038 |
| 2 | 1. | 1,570 | 1,167 | 1,790 | 1,332 | 2,060 | 1,297 | 1,450 | 1,312 | 1,840 | 1,272 |
| | 2. | 2,050 | 1,250 | 1,440 | 1,216 | 1,950 | 1,411 | 1,340 | 1,240 | 1,970 | 1,464 |
| | 3. | 1,880 | 1,295 | 2,100 | 1,401 | 1,970 | 1,537 | 1,490 | 1,290 | 1,780 | 1,358 |
| | 4. | 1,550 | 1,296 | 1,700 | 1,236 | 1,730 | 1,354 | 1,760 | 1,322 | 1,820 | 1,505 |
| | 5. | 2,050 | 1,355 | 1,390 | 1,184 | 1,860 | 1,281 | 1,530 | 1,362 | 1,840 | 1,337 |
| | Mittelwert | 1,820 | 1,273 | 1,684 | 1,274 | 1,914 | 1,376 | 1,514 | 1,305 | 1,850 | 1,387 |
| 3 | 1. | 0,310 | 1,046 | 0,420 | 1,143 | 0,480 | 1,128 | 0,230 | 1,036 | 0,340 | 1,067 |
| | 2. | 0,280 | 1,045 | 0,200 | 1,043 | 0,270 | 1,048 | 0,320 | 1,052 | 0,200 | 1,039 |
| | 3. | 0,280 | 1,073 | 0,240 | 1,056 | 0,440 | 1,120 | 0,280 | 1,068 | 0,190 | 1,042 |
| | 4. | 0,280 | 1,049 | 0,290 | 1,038 | 0,350 | 1,101 | 0,230 | 1,054 | 0,240 | 1,054 |
| | 5. | 0,390 | 1,121 | 0,240 | 1,051 | 0,410 | 1,098 | 0,260 | 1,045 | 0,360 | 1,111 |
| | Mittelwert | 0,308 | 1,067 | 0,278 | 1,066 | 0,390 | 1,099 | 0,264 | 1,051 | 0,266 | 1,063 |
| 4 | 1. | 0,300 | 1,101 | 0,110 | 1,021 | 0,100 | 1,015 | 0,200 | 1,042 | 0,230 | 1,076 |
| | 2. | 0,410 | 1,097 | 0,180 | 1,056 | 0,170 | 1,025 | 0,180 | 1,039 | 0,230 | 1,070 |
| | 3. | 0,190 | 1,042 | 0,120 | 1,022 | 0,180 | 1,031 | 0,190 | 1,030 | 0,170 | 1,035 |
| | 4. | 0,230 | 1,061 | 0,140 | 1,039 | 0,130 | 1,021 | 0,120 | 1,021 | 0,160 | 1,021 |
| | 5. | 0,170 | 1,041 | 0,160 | 1,040 | 0,250 | 1,045 | 0,210 | 1,054 | 0,100 | 1,016 |
| | Mittelwert | 0,260 | 1,068 | 0,142 | 1,036 | 0,166 | 1,027 | 0,180 | 1,037 | 0,178 | 1,044 |
| 5 | 1. | 0,400 | 1,050 | 0,320 | 1,047 | 0,540 | 1,100 | 0,440 | 1,102 | 0,320 | 1,113 |
| | 2. | 0,260 | 1,048 | 0,230 | 1,042 | 0,550 | 1,077 | 0,470 | 1,098 | 0,400 | 1,109 |
| | 3. | 0,390 | 1,048 | 0,310 | 1,126 | 0,360 | 1,076 | 0,450 | 1,078 | 0,570 | 1,251 |
| | 4. | 0,400 | 1,071 | 0,570 | 1,102 | 0,540 | 1,169 | 0,510 | 1,113 | 0,430 | 1,212 |
| | 5. | 0,370 | 1,062 | 0,430 | 1,076 | 0,500 | 1,124 | 0,450 | 1,085 | 0,260 | 1,076 |
| | Mittelwert | 0,364 | 1,056 | 0,372 | 1,079 | 0,498 | 1,109 | 0,464 | 1,095 | 0,396 | 1,152 |
| 6 | 1. | 0,280 | 1,048 | 0,220 | 1,052 | 0,400 | 1,101 | 0,300 | 1,038 | 0,290 | 1,044 |
| | 2. | 0,280 | 1,038 | 0,200 | 1,041 | 0,290 | 1,061 | 0,170 | 1,031 | 0,240 | 1,061 |
| | 3. | 0,260 | 1,041 | 0,220 | 1,048 | 0,320 | 1,086 | 0,250 | 1,046 | 0,210 | 1,052 |
| | 4. | 0,350 | 1,079 | 0,230 | 1,061 | 0,470 | 1,118 | 0,250 | 1,056 | 0,170 | 1,022 |
| | 5. | 0,270 | 1,052 | 0,260 | 1,063 | 0,340 | 1,078 | 0,250 | 1,058 | 0,220 | 1,034 |
| | Mittelwert | 0,288 | 1,052 | 0,226 | 1,053 | 0,364 | 1,089 | 0,244 | 1,046 | 0,226 | 1,043 |
| 7 | 1. | 0,260 | 1,068 | 0,090 | 1,014 | 0,090 | 1,018 | 0,240 | 1,066 | 0,160 | 1,027 |
| | 2. | 0,220 | 1,058 | 0,110 | 1,021 | 0,100 | 1,018 | 0,210 | 1,061 | 0,140 | 1,023 |
| | 3. | 0,220 | 1,050 | 0,090 | 1,011 | 0,120 | 1,019 | 0,320 | 1,097 | 0,290 | 1,082 |
| | 4. | 0,220 | 1,045 | 0,100 | 1,017 | 0,090 | 1,013 | 0,200 | 1,064 | 0,170 | 1,036 |
| | 5. | 0,210 | 1,054 | 0,090 | 1,011 | 0,110 | 1,017 | 0,210 | 1,052 | 0,300 | 1,102 |
| | Mittelwert | 0,226 | 1,055 | 0,096 | 1,015 | 0,102 | 1,017 | 0,236 | 1,068 | 0,212 | 1,054 |
| 8 | 1. | 0,230 | 1,050 | 0,210 | 1,049 | 0,210 | 1,045 | 0,310 | 1,108 | 0,380 | 1,078 |
| | 2. | 0,240 | 1,050 | 0,210 | 1,044 | 0,440 | 1,148 | 0,230 | 1,050 | 0,300 | 1,088 |
| | 3. | 0,230 | 1,042 | 0,220 | 1,044 | 0,270 | 1,049 | 0,240 | 1,057 | 0,250 | 1,048 |
| | 4. | 0,280 | 1,056 | 0,400 | 1,144 | 0,430 | 1,134 | 0,280 | 1,088 | 0,360 | 1,097 |

| | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5. | 0,200 | 1,040 | 0,220 | 1,049 | 0,280 | 1,056 | 0,230 | 1,054 | 0,210 | 1,036 | |
| Mittelwert | 0,236 | 1,048 | 0,252 | 1,066 | 0,326 | 1,086 | 0,258 | 1,071 | 0,300 | 1,069 | |
| 9 | 1. | 0,240 | 1,042 | 0,190 | 1,041 | 0,330 | 1,113 | 0,300 | 1,088 | 0,160 | 1,028 |
| | 2. | 0,240 | 1,033 | 0,210 | 1,048 | 0,360 | 1,099 | 0,200 | 1,036 | 0,210 | 1,037 |
| | 3. | 0,300 | 1,055 | 0,210 | 1,041 | 0,260 | 1,041 | 0,240 | 1,047 | 0,200 | 1,033 |
| | 4. | 0,420 | 1,133 | 0,260 | 1,051 | 0,300 | 1,091 | 0,360 | 1,083 | 0,220 | 1,045 |
| | 5. | 0,230 | 1,043 | 0,210 | 1,037 | 0,340 | 1,067 | 0,200 | 1,041 | 0,260 | 1,052 |
| Mittelwert | | 0,286 | 1,061 | 0,216 | 1,044 | 0,318 | 1,082 | 0,260 | 1,059 | 0,210 | 1,039 |
| 10 | 1. | 0,640 | 1,386 | 0,520 | 1,277 | 0,500 | 1,214 | 0,650 | 1,389 | 0,440 | 1,177 |
| | 2. | 0,530 | 1,329 | 0,410 | 1,215 | 0,520 | 1,231 | 0,810 | 1,501 | 0,560 | 1,265 |
| | 3. | 0,690 | 1,454 | 0,420 | 1,213 | 0,360 | 1,149 | 0,900 | 1,526 | 0,450 | 1,211 |
| | 4. | 0,670 | 1,327 | 0,420 | 1,164 | 0,410 | 1,185 | 0,720 | 1,436 | 0,610 | 1,272 |
| | 5. | 0,760 | 1,426 | 0,360 | 1,168 | 0,510 | 1,204 | 0,750 | 1,414 | 0,450 | 1,182 |
| | 6. | 0,780 | 1,481 | 0,470 | 1,209 | 0,420 | 1,170 | 0,760 | 1,485 | 0,630 | 1,284 |
| | 7. | 0,740 | 1,501 | 0,440 | 1,261 | 0,600 | 1,281 | 0,880 | 1,532 | 0,650 | 1,355 |
| | 8. | 0,610 | 1,401 | 0,300 | 1,149 | 0,460 | 1,139 | 0,720 | 1,431 | 0,420 | 1,172 |
| | 9. | 0,690 | 1,440 | 0,610 | 1,351 | 0,460 | 1,216 | 0,760 | 1,464 | 0,580 | 1,334 |
| | 10. | 0,670 | 1,443 | 0,410 | 1,227 | 0,550 | 1,282 | 0,640 | 1,341 | 0,480 | 1,251 |
| | 11. | 0,640 | 1,420 | 0,510 | 1,271 | 0,570 | 1,263 | 0,840 | 1,458 | 0,440 | 1,172 |
| | 12. | 0,670 | 1,472 | 0,420 | 1,242 | 0,440 | 1,194 | 0,810 | 1,481 | 0,390 | 1,106 |
| | 13. | 0,630 | 1,429 | 0,320 | 1,108 | 0,760 | 1,394 | 0,750 | 1,397 | 0,460 | 1,175 |
| | 14. | 0,590 | 1,275 | 0,270 | 1,126 | 0,520 | 1,251 | 0,700 | 1,473 | 0,530 | 1,239 |
| | 15. | 0,570 | 1,378 | 0,300 | 1,135 | 0,440 | 1,164 | 0,720 | 1,448 | 0,560 | 1,274 |
| Mittelwert | | 0,659 | 1,411 | 0,412 | 1,208 | 0,501 | 1,222 | 0,761 | 1,452 | 0,510 | 1,231 |

9 Danksagung

Herrn Prof. Dr. Martin Jung danke ich für die Überlassung des Themas, die vorzügliche und freundliche Betreuung bei der Durchführung der Arbeit.

Mein Dank gilt Herrn Magdowsky für die ausführliche Einarbeitung am Rasterelektronenmikroskop. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Bethge für die Entwicklung der REM-Aufnahmen bedanken.

Des Weiteren danke ich Frau Meier für ihre labortechnischen Ratschläge.

Kathrin Sehr danke ich ganz besonders für die hervorragende Zusammenarbeit während der praktischen Versuche sowie für die wertvollen Hinweise und Anregungen bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt auch meiner Familie für die stetige Unterstützung und Motivation. Insbesondere danke ich meiner Mutter, die mir bei der Korrektur der Arbeit eine wertvolle Hilfe war.

Mein besonderer Dank gilt meinem Ehemann Robert Anetsmann für sein Verständnis und seine große Unterstützung, mit der er meine Arbeit begleitet hat.

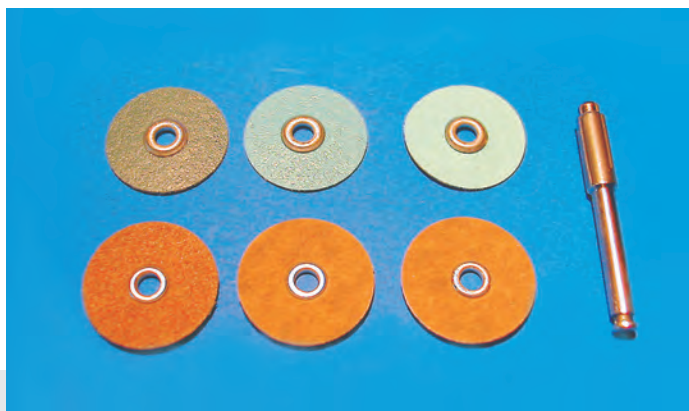
Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Giessen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Veröffentlichung:

Jung, M., Eichelberger, K., Klimek, J.:

Surface geometry of four nanofiller and one hybrid composite after one-step and multiple-step polishing.

Oper Dent 32(4) (2007), 347-355.



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN 3-8359-5480-6

